



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA

MÁSTER UNIVERSITARIO DE ESTUDIOS AVANZADOS DE ARQUITECTURA -
BARCELONA
LÍNEA DE GESTIÓN Y VALORACIÓN URBANA Y ARQUITECTÓNICA 2018-2019

**APORTACIONES TÉRMICAS DE LAS COBERTURAS EN
SUPERFICIES HORIZONTALES DEL ESPACIO PÚBLICO, A LA
ISLA DE CALOR URBANA. CASOS DE SANTS Y SAN MARTÍ DE
PROVENÇALS**

Autora:
MERLY DELGADILLO YUPANQUI
merlydj.246@gmail.com

Director de Tesis:
ROLANDO BIERE ARENAS

Barcelona, octubre 2019

Contenido

PRESENTACIÓN	11
RESUMEN.....	13
CAPITULO I. INTRODUCCION	15
1.1. Objetivos.....	17
1.1.1. Objetivo general.....	17
1.1.2. Objetivos específicos	17
1.2. Hipótesis	18
1.3. Estructura	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	19
2.1. El balance energético.....	19
2.2. Climatología urbana	23
2.2.1. Escalas espaciales del clima urbano	23
2.2.1.1. Escalas horizontales	23
2.2.1.2. Escalas verticales.....	24
2.2.2. Características en el clima local	26
2.2.2.1. Local climate zones o Zonas climáticas Locales	26
2.2.2.2. The Urban climatic maps o Climatopes	28
2.2.3. Características en el microclima	30
2.3. Isla de calor urbana	31
2.3.1. Antecedentes.....	31
2.3.2. Definición y aportaciones	32
2.3.3. Tipo de temperaturas.....	32
2.3.4. Enfoque de las coberturas en superficies	33
2.3.5. Implicancias de las superficies en el confort térmico urbano.....	37
CAPITULO III. ESTADO DEL ARTE	38
3.1. Estudios sobre el clima urbano en Barcelona.....	38
3.1.1. Estudios sobre el clima urbano a escala local	42
3.1.2. Estudios sobre el clima urbano a la microescala	43
3.2. Revisión de nuevas propuestas metodológicas para el clima urbano a nivel nacional e internacional	45
3.2.1. Estudios de simulación de LST en superficies horizontales en Barcelona	45
3.2.2. Estudios de análisis metodológicos del clima urbano y medio físico a nivel internacional	47
CAPITULO VI. METODOLOGIA.....	50
4.1. Selección de casos de estudio	50
4.1.1. Criterios de selección.....	51
4.1.2. Descripción	51
4.2. Métodos para recolección de datos e información	55
4.2.1. Cartográfica	55
4.2.2. Climática histórica	56
4.2.3. Imágenes satelitales	57

4.2.4. Medición en campo a escala local	58
4.3. Métodos de análisis	59
4.3.1. Definición de días para la medición en campo	59
4.3.2. Definición de puntos para la medición en campo	65
4.3.3. Reclasificación de capas cartográficas	66
4.3.4. Cálculo de áreas por tipología de coberturas y efectos de sol - sombra	67
4.3.5. Análisis de imágenes satelitales mediante teledetección	67
4.3.6. Obtención de modelos ráster <i>LSAT</i> y <i>LST</i> a escala local	69
4.3.7. Definición de variables de la estructura urbana	69
4.4. Métodos de Procesamiento	70
4.4.1. Modelo ráster de <i>LST</i> a escala local (resolución 2.5m ² por pixel)	70
4.4.2. Relación de funciones mediante Correlación de Pearson y Regresión Lineal	71
CAPITULO V. DESARROLLO DE CASOS DE ESTUDIO	72
5.1. Cuantificación de la tipología de coberturas y efectos de sol - sombra	72
5.2. Modelo de simulación de <i>LST</i> y otros indicadores según imagen satelital	80
5.3. Modelo de simulación de <i>LSAT</i> y otras variables climáticas según mediciones en campo	84
5.4. Modelo de simulación de <i>LST</i> según mediciones en campo	95
5.5. Composición mediante ráster de <i>LST</i> (resolución 2.5m ² por pixel)	107
5.6. Modelos de Correlación de Pearson y Regresión simple	108
CONCLUSIONES	122
BIBLIOGRAFÍA	130

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Proyecciones del cambio de temperaturas del 2010-2040 para la península Ibérica
- Figura 2: *Urban Heat Island* en la Región Metropolitana de Barcelona
- Figura 3: Esquema de la estructura urbana
- Figura 4: Flujos de entrada de la energía radiante del sol (%)
- Figura 5: Ecuación del balance energético superficial urbano
- Figura 6: Balance energético superficial urbano
- Figura 7: Escalas horizontales en relación a características de tiempo y espacio
- Figura 8: Clasificación de las capas verticales urbanas
- Figura 9: Esquema de las escalas espaciales urbanas en capas y subcapas
- Figura 10: Flujos asociados con el flujo de aire sobre las matrices de edificios
- Figura 11: Valor de las propiedades de *Local Climate Zones*
- Figura 12: Características de *Local Climate Zones*
- Figura 13: Estructura de *Urban Climatic Maps*
- Figura 14: Procesos que interactúan en el clima urbano a microescala
- Figura 15: Variaciones de día y noche del *Land surface temperature* y *Land surface air temperature*
- Figura 16: Esquema de variables controlables y no controlables en la generación del *UHI*
- Figura 17: Albedo y temperatura de superficie de los materiales
- Figura 18: Materiales calientes y fríos
- Figura 19: Esquema del proceso de formación de la sensación térmica
- Figura 20: Perfil térmico medio respecto al perfil urbano aproximado de la ciudad de Barcelona
- Figura 21: Configuración del *UHI* en Barcelona y su área metropolitana
- Figura 22: Perfil térmico medio respecto al perfil urbano aproximado, que atraviesa la ciudad de Barcelona de SO a NE
- Figura 23: Diferencia del *LST* día y noche de la Región Metropolitana de Barcelona realizado a partir de Modis
- Figura 24: Mapa del *LST* de Barcelona y área metropolitana realizado a partir de Landsat-8
- Figura 25: *LST* de día de (a) Coll Fava y (b) Parc Central, según Landsat-8
- Figura 26: Mapa de *LST* de día en puntos de medición en (a) Turó Park y (b) Parc del Centre del Poblenou
- Figura 27: Mapa de *LSAT* de día en puntos de medición en Turó Park
- Figura 28: Mapa de *LSAT* de día en puntos de medición en Parc del Centre del Poblenou
- Figura 29: Proceso metodológico para alcanzar mapas con *LST* simuladas – Caso Les Marines
- Figura 30: Hipótesis de cubiertas de suelo – Caso Llevant Mar
- Figura 31: Obtención de *LST* simuladas – Caso Llevant Mar
- Figura 32: Ubicación de los casos de estudio en cada distrito
- Figura 33: Descripción catastral de los casos de estudio: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2
- Figura 34: Fotografías del entorno del caso de estudio N°1
- Figura 35: Fotografías del entorno del caso de estudio N°2
- Figura 36: Cámara digital réflex (Canon, EOS Rebel T6)
- Figura 37: Skywatch Windoo
- Figura 38: Cámara termográfica Flir E60
- Figura 39: EMA El Raval
- Figura 40: EMA Zoo
- Figura 41: EMA Zona Universitaria
- Figura 42: Ubicación de estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas y casos de estudio
- Figura 43: Puntos de medición - Caso N°1
- Figura 44: Puntos de medición - Caso N°2
- Figura 45: Diagrama para la obtención del *LST*
- Figura 46: Tipología de coberturas en superficies horizontales de los casos de estudio: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2
- Figura 47: Comparación porcentual de la tipología de coberturas en superficies horizontales de los casos de estudio
- Figura 48: Superficie con sombras proyectadas por edificaciones de los casos de estudio - rango horario 1: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2
- Figura 49: Superficie con sombras proyectadas por edificaciones de los casos de estudio - rango horario 2: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2

Figura 50: Superficie con sombras proyectadas por edificaciones de los casos de estudio - rango horario 3:
(a) Caso N°1 y (b) Caso N°2

Figura 51: Variación porcentual de áreas soleadas y sombreadas de los casos de estudio

Figura 52: Mapa del *LST* de día - Caso N°1

Figura 53: Mapa del *LST* de día - Caso N°12

Figura 54: Mapa de *NDBI* - Caso N°1

Figura 55: Mapa de *NDBI* - Caso N°2

Figura 56: Mapa de *IBI* - Caso N°1

Figura 57: Mapa de *IBI* - Caso N°2

Figura 58: Mapa de *BU* - Caso N°1

Figura 59: Mapa de *BU* - Caso N°2

Figura 60: Mapa de *LSE* - Caso N°1

Figura 61: Mapa de *LSE* - Caso N°2

Figura 62: Mapa de albedo - Caso N°1

Figura 63: Mapa de albedo - Caso N°2

Figura 64: Mapas del *LSAT* según cuatro rangos horarios - Caso N°1

Figura 65: Mapas del *LSAT* según cuatro rangos horarios - Caso N°2

Figura 66: Variación del *LSAT* según cuatro rangos horarios - Caso N°1

Figura 67: Variación del *LSAT* según cuatro rangos horarios - Caso N°2

Figura 68: Mapas de la humedad relativa según cuatro rangos horarios - Caso N°1

Figura 69: Mapas de la humedad relativa según cuatro rangos horarios - Caso N°2

Figura 70: Variación de la humedad relativa según cuatro rangos horarios - Caso N°1

Figura 71: Variación de la humedad relativa según cuatro rangos horarios - Caso N°2

Figura 72: Mapas de la velocidad de vientos según cuatro rangos horarios - Caso N°1

Figura 73: Mapas de la velocidad de vientos según cuatro rangos horarios - Caso N°2

Figura 74: Variación de velocidad de vientos según cuatro rangos horarios - Caso N°1

Figura 75: Variación de velocidad de vientos según cuatro rangos horarios - Caso N°2

Figura 76: Variación del *LST* día por tipología de cobertura soleadas y sombreadas - Caso N°1

Figura 77: Variación del *LST* día por tipología de cobertura soleadas y sombreadas - Caso N°2

Figura 78: Variación del *LST* día y noche por tipología de cobertura según efectos de sol y sombra - Caso N°1

Figura 79: Variación del *LST* día y noche por tipología de cobertura según efectos de sol y sombra - Caso N°2

Figura 80: Mapas del *LST* media según rangos horarios - Caso 1

Figura 81: Variación del *LST* día y noche por puntos de medición según efectos de sol y sombra - Caso N°1

Figura 82: Variación de *LST* media de día y noche por puntos de medición según efectos de sol y sombra - Caso N°1

Figura 83: Mapas del *LST* media según rangos horarios - Caso 2

Figura 84: Variación del *LST* día y noche por puntos de medición según efectos de sol y sombra - Caso N°2

Figura 85: Variación del *LST* media de día y noche por puntos de medición según efectos de sol y sombra - Caso N°2

Figura 86: *LSTm* diferencia – Caso N°1

Figura 87: *LSTm* diferencia – Caso N°1

Figura 88: Ráster de 2.5m2 por pixel del *LST* máxima de día – Caso N°1

Figura 89: Ráster de 2.5m2 por pixel del *LST* máxima de día – Caso N°2

Figura 90: Regresión Lineal con variable independiente: *LST* - Caso N°1

Figura 91: Regresión Lineal con variable independiente: Morfología urbana - Caso N°2

Figura 92: Regresión Lineal con variable independiente: Variable morfológica - Caso N°1

Figura 93: Regresión Lineal con variable independiente: Variable morfológica - Caso N°2

Figura 94: Regresión Lineal con variable independiente: *LST* - Caso N°2

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Flujos de energía solar de entrada y salida
Tabla 2: Características básicas del <i>Land surface temperature</i> y <i>Land surface air temperature</i>
Tabla 3: Características de algunos materiales según albedo y emisividad
Tabla 4: <i>LST</i> y <i>LSAT</i> según mediciones “in situ” y Landsat-8
Tabla 5: Variables e indicadores de la propuesta metodológica
Tabla 6: Caracterización de los casos de estudio
Tabla 7: Datos de las estaciones El Raval, Zoo y Zona Universitaria
Tabla 8: Temperatura máxima media mensual (°C) de estaciones El Raval, Zoo y Zona Universitaria, 2014-2018
Tabla 9: Media mensual de la irradiación solar global (°C) de estaciones El Raval y Zona Universitaria, 2014-2018
Tabla 10: Humedad relativa media mensual (%) de estaciones El Raval, Zoo y Zona Universitaria, 2014-2018
Tabla 11: Precipitación mensual (mm) de estaciones El Raval y Zona Universitaria, 2014-2018
Tabla 12: Temperatura máxima diaria (°C) de estaciones El Raval y Zoo, 2017-2018
Tabla 13: Predicciones del tiempo de las dos últimas semanas de julio, 2019
Tabla 14: Fecha y hora de campañas de medición
Tabla 15: Cuantificación de la tipología de coberturas en superficies horizontales de los casos de estudio
Tabla 16: Cuantificación de áreas soleadas y sombreadas de los casos de estudio
Tabla 17: Cuantificación de tipología de coberturas en superficies horizontales - Rango horario 1
Tabla 18: Cuantificación de tipología de coberturas en superficies horizontales - Rango horario 2
Tabla 19: Cuantificación de tipología de coberturas en superficies horizontales - Rango horario 3
Tabla 20: Comparación de los indicadores según imagen satelital de los casos de estudio
Tabla 21: Comparación de valores medios de las variables climáticas de los dos casos de estudio
Tabla 22: <i>LST</i> por tipología de coberturas soleadas y sombreadas de los casos de estudio
Tabla 23: Diferencia de <i>LST</i> media, según puntos de medición - Caso N°1
Tabla 24: Diferencia de <i>LST</i> media, según puntos de medición - Caso N°2
Tabla 25: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según material de coberturas - Caso N°1
Tabla 26: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según material de coberturas - Caso N°2
Tabla 27: Correlación de Pearson de variables climáticas y morfológicas - Caso N°1
Tabla 28: Correlación de Pearson de <i>LST</i> , indicadores de Landsat-8 y variables morfológicas - Caso N°1
Tabla 29: Correlación de Pearson de variables climáticas y morfológicas - Caso N°2
Tabla 30: Correlación de Pearson de <i>LSAT</i> , <i>LST</i> y variables morfológicas - Caso N°2
Tabla 31: Correlación de Pearson de <i>LST</i> , indicadores de Landsat-8 y variables morfológicas - Caso N°2
Tabla 32: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según la variable morfológica - Caso N°1
Tabla 33: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según la variable morfológica - Caso N°2
Tabla 34: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según el <i>LSAT</i> - Caso N°2
Tabla 35: Correlación de Pearson entre variables de morfología y del clima urbano - <i>LST</i> y <i>LSAT</i> -
Tabla 36: Correlación de Pearson entre <i>LST</i> y <i>LSAT</i>
Tabla 37: Diferencias térmicas del <i>LST</i> y <i>LSAT</i>
Tabla 38: Comparación de las incidencias térmicas según tipología de coberturas
Tabla 39: Correlación de Pearson entre variables de morfología e indicadores de Landsat-8
Tabla 40: Comparación de valores medios de variables de los casos de estudio

A Jorge Luis y Norma,
*Cristhy, Valeria por siempre
creer en mí.
A mi Joaquín,
por dibujar mis días con su sonrisa.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por siempre protegerme, darme fuerza y fortaleza durante este año de estudios lejos de mi tierra, de mi gente, de mi familia; por acompañarme en este camino que culmina alcanzando un nuevo objetivo profesional.

A la Universidad Politécnica de Cataluña - UPC y Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona - ETSAB, por darme la oportunidad de ser una mejor profesional, así como, a los profesores del máster, por brindarme nuevos conocimientos en el campo de la Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación.

Al Arq. Rolando Biere Arenas, asesor de la tesis, por su disposición, confianza y dedicación de tiempo, me ha guiado en el desarrollo de la presente investigación.

Gracias a mis amigos y familiares en Perú y España, que siempre estuvieron pendientes de mí, y desde la distancia demostraron su invaluable amistad. En especial, a mis padrinos, a quienes llevo en los más profundo de mi corazón.

Barcelona me ha sorprendido de distintas maneras, pero no hubiera sido fácil sin Patri y Nel, los que te conocen, los que te quieren.

PRESENTACIÓN

La presente investigación como tesis final del “Máster en Estudios Avanzados en Arquitectura - MBArch” se desarrolla en el marco del Seminario de Investigación de la Línea Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica cursado en el periodo 2018-2019.

La Universidad Politécnica de Cataluña - UPC tiene un centro específico de investigación, el Centro de Políticas de Suelo y Valoraciones - CPSV ubicado en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura - ETSAB, y que en su nueva etapa plantea nuevos ejes como la política de suelo, la gestión y administración del urbanismo, la valoración inmobiliaria y urbana, los técnicas de sistemas de información geográfica al análisis espacial de las estructuras urbanas, la modelización virtual de la arquitectura de la ciudad y el análisis de la calidad de vida urbana en la perspectiva de un desarrollo sostenible.

Este centro de investigación desarrolla el proyecto Urban - CLIMPLAN, a cargo del investigador principal Dr. Arquitecto Josep Roca Cladera, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad - MINECO y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional - FEDER, cuyo objetivo principal es el análisis de los factores climáticos, territoriales y urbanos que generan la isla de calor urbano en el sistema metropolitano de Barcelona con el fin de mejorar la toma de decisiones (público y privada) en planificación y gestión urbana y reducir los efectos de cambio climático. (CPSV, 2016, parr.1)

Asimismo, el proyecto Urban - CLIMPLAN establece 14 objetivos específicos, el tercero se plantea en el análisis más profundo de las temperaturas de la superficie terrestre, que propone: “El modelado mediante técnicas remote sensing, a partir de Landsat 8, Modis y otros satélites, de la temperatura de la superficie terrestre - *LST*, así como de los factores que la determinan: componente natural, climático-geográfica (altitud, latitud, distancia al mar y otros), y componente de artificialización (vegetación, usos del suelo, intensidad de la edificación y otros). A tal efecto se elaborarán modelos a diferentes escalas de resolución utilizando técnicas de regresión múltiple ordinaria - OLS, así como geográficamente ponderada - GWR”. (CPSV, 2016, parr.3)

Por lo tanto, esta investigación busca contribuir al proyecto Urban - CLIMPLAN y otros estudios relacionado al tema, respecto al análisis urbano -a la microescala- que se realiza a las temperaturas de la superficie terrestre en Barcelona y su implicancia en la isla de calor, mediante técnicas de remote sensing y observación sinóptica.

RESUMEN

Las áreas urbanizadas y el crecimiento de las ciudades han acarreado variaciones significativas en el clima urbano a nivel mundial, que resultan ser herramientas relevantes de modificación antrópica respecto al medio natural y calidad de vida de la población, generando diferencias térmicas-*Urban Heat Island (UHI)*-. Es así como las ciudades, absorben mayor radiación solar que son determinados principalmente por su contexto urbano inmediato, como las coberturas de suelo, materiales de construcción y densidad de edificaciones, forma de apropiación del espacio y áreas verdes, generando cambios en el clima urbano en distintas escalas -mesoclima, clima local o microclima-. Actualmente, es un tema de gran interés, pero en Barcelona no se han desarrollado muchas investigaciones del clima urbano a la escala de microclima.

Por tal motivo, el propósito principal de esta investigación es determinar y cuantificar la incidencia de la radiación solar directa e indirecta sobre las coberturas en superficies horizontales del espacio público, y la aportación de éstas al *LSAT* en dos contextos urbanos de características físicas diferentes en la ciudad de Barcelona, España; Para ello, se realiza mediciones “in situ” de las variables climáticas (*LSAT*, humedad relativa, velocidad de viento, *LST*) con el uso de un anemómetro y una cámara termográfica, análisis de imagen del satélite Landsat-8 para el cálculo de indicadores (*LST* día, *NDBI*, *IBI*, *BU*, *LSE*, Albedo), análisis de mapas LIDAR y cartográficas para obtener variables morfológicas (intensidad edificatoria, verticalidad, ancho de vía, aspect ratio, orientación) y tipología de coberturas soleadas y sombreadas del espacio público.

Posteriormente, se relacionaron los datos de *LST* y *LSAT*, con las variables morfológicas, sobre ello la influencia del *LST* sobre el *LSAT* es mayor en Sant Martí de Provençals que en Sants, por otro lado, no se registraron relaciones determinantes entre las variables de morfología y el *LSAT*, en ambos casos. Sin embargo, la variable de la morfología que más incide en el *LST* a la hora pico del día, es el ancho de vía para Sants, mientras que la intensidad edificatoria incide tanto en el *LST* horas después del amanecer y en el *LST* media bajo sombra en Sant Martí de Provençals. Respecto a las diferencias térmicas entre ambos casos, se verifica que las de superficie (3°C, 11°C en Sants y 8°C en Sant Martí de Provençals) son más significativas que las de aire (1°C, 3°C en Sants y 2°C en Sant Martí de Provençals), en cuanto a coberturas, el suelo desnudo o con poca vegetación” y la” arena” son las que mayor enfriamiento -en Sant y Sant Martí de Provençals, respectivamente-.

Palabras clave: Clima urbano, microescala, Landsat-8, morfología urbana, SIG.

CAPITULO I. INTRODUCCION

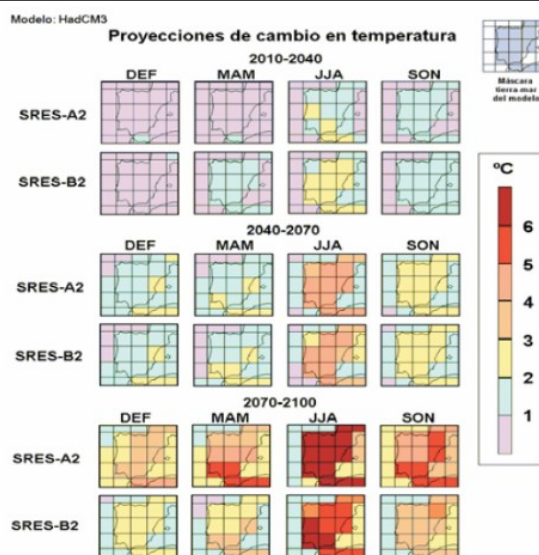
El cambio climático es una realidad desde hace años (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007) y, cada vez más, en aumento (Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad - Gobierno de Aragón, s.f.). Esta situación ha generado una preocupación mundial, proporcional por parte de la sociedad, en el sentido de reducir su impacto (ICCP, 2014), producto de sus efectos en el ambiente. Sin embargo, esta preocupación no ha sido suficiente y no se ha materializado en medidas efectivas de control de sus efectos, tanto así que cada día, el cambio climático se agudiza más.

Martin-Vide (2016) indica que el planeta ha pasado previamente, a lo largo de su historia geológica, por cambios climáticos, tanto por causas naturales endógenas, como externas. Sin embargo, esta vez, dichos cambios se producen por causas antrópicas (producto del impacto de las actividades humanas; industrias, edificios, medios de transporte, etc.). Por tanto, es el “hombre”, el componente principal de este cambio y debe ser consciente del impacto que genera; debido que son las ciudades donde se ejercen las actividades antrópicas (IPCC, 2007) generando los gases efecto invernadero (Blanco *et al.*, 2014) y radiación por superficie de terrenos urbanizados (Oke, 2006), se le conoce como clima urbano.

En Europa, tres cuartas partes de la población viven en áreas urbanizadas (European Environment Agency [EEA], 2012), por ende, este gran volumen de personas constituye, quizás, la población más vulnerable ante los efectos del cambio climático en áreas urbanas. Un ejemplo de los efectos de este fenómeno, fue la situación de ola de calor vivida en el verano de 2003 (durante 4 meses) en el centro y oeste del continente, en que por más de 3 noches la temperatura del aire no disminuyó de los 25°C (Arellano & Roca, 2018). Ésta comprometió la salud pública general e incluso produjo 70.000 muertes, alcanzando en Barcelona, los mayores de 65 años, el 36% de éstas. Cabe resaltar que para el 2017, la quinta parte de la población de esta ciudad superaba esta edad (21.5%), según el Instituto Nacional de Estadística de España.

Desde 1975 es evidente el incremento de la temperatura media anual en España, pero tras una investigación de 27 observatorios ibéricos con series que empiezan en 1869, se concluyeron: el aumento significativo de las temperaturas máximas, las temperaturas mínimas aumentaron de manera similar y es en invierno la estación cuando manifestó la diferencia del calentamiento (Staudt, 2004).

Figura 1: Proyecciones del cambio de temperaturas del 2010-2040 para la península Ibérica

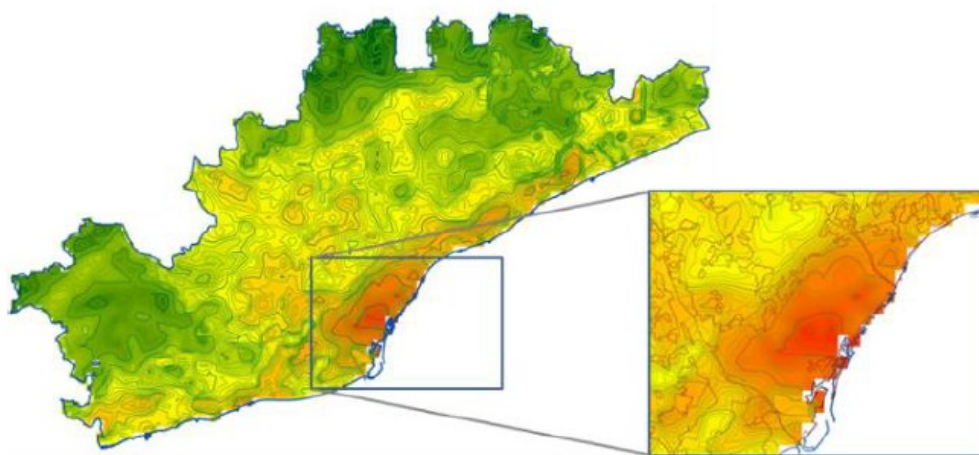


Fuente: De Castro *et al.*, 2005, p.31

A una escala más próxima, respecto a la Región Metropolitana de Barcelona, las áreas artificializadas o impermeables concentran mayor temperatura de superficie por la noche alcanzando una diferencia de 7.2%, respecto a áreas rurales, rústicos o permeables. Esta diferencia es lo que se denomina, Isla de calor urbana (UHI), es decir, la diferencia más relevante de la temperatura del área urbana en relación a la rural. Además, tras un análisis combinado de teledetección y e información local, es relevante la aproximación -a gran escala- alcanzada de las temperaturas de superficie registradas tanto en el día, la noche y la diferencia entre ellos, por los diferentes usos de suelo; siendo la “densidad alta y media” el tipo de superficie que más temperatura diferencial concentra, 12.72°C. (Arellano *et al.*, 2018)

A pesar de este alcance, aún es necesario una aproximación más cercana a escala local del clima urbano debido a la complejidad espacial de ciudades por al aumento de población y actividades urbanas (Howard *et al.*, 2009)

Figura 2: *Urban Heat Island* en la Región Metropolitana de Barcelona



Fuente: Arellano *et al.*, 2018, p.11

Una vez identificado el evidente aumento general de las temperaturas a diferentes escalas: global, continental y regional, es evidente que es un problema que continuará y probablemente se agrave en cambios más drásticos respecto a los presentados en los últimos años.

El Área Metropolitana de Barcelona, es el área más urbanizada y de superficies impermeables en toda la región, y en horas nocturnas se observa mayor concentración de temperaturas. Por lo tanto, al ser una ciudad de gran envergadura en España, es relevante hacer una aproximación a una escala más cercana como la local y conocer las temperaturas de día y noche.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El clima urbano se ve influenciado por parámetros físicos y ambientales, esto genera que se altere la isla de calor (Oke, 1998). En este contexto, el objetivo principal de esta investigación es:

Determinar y cuantificar la incidencia de la radiación solar directa e indirecta sobre las coberturas en superficies horizontales, y la aportación de éstas al LSAT en dos escenarios de distinta morfología urbana que cuenta la ciudad de Barcelona.

1.1.2. Objetivos específicos

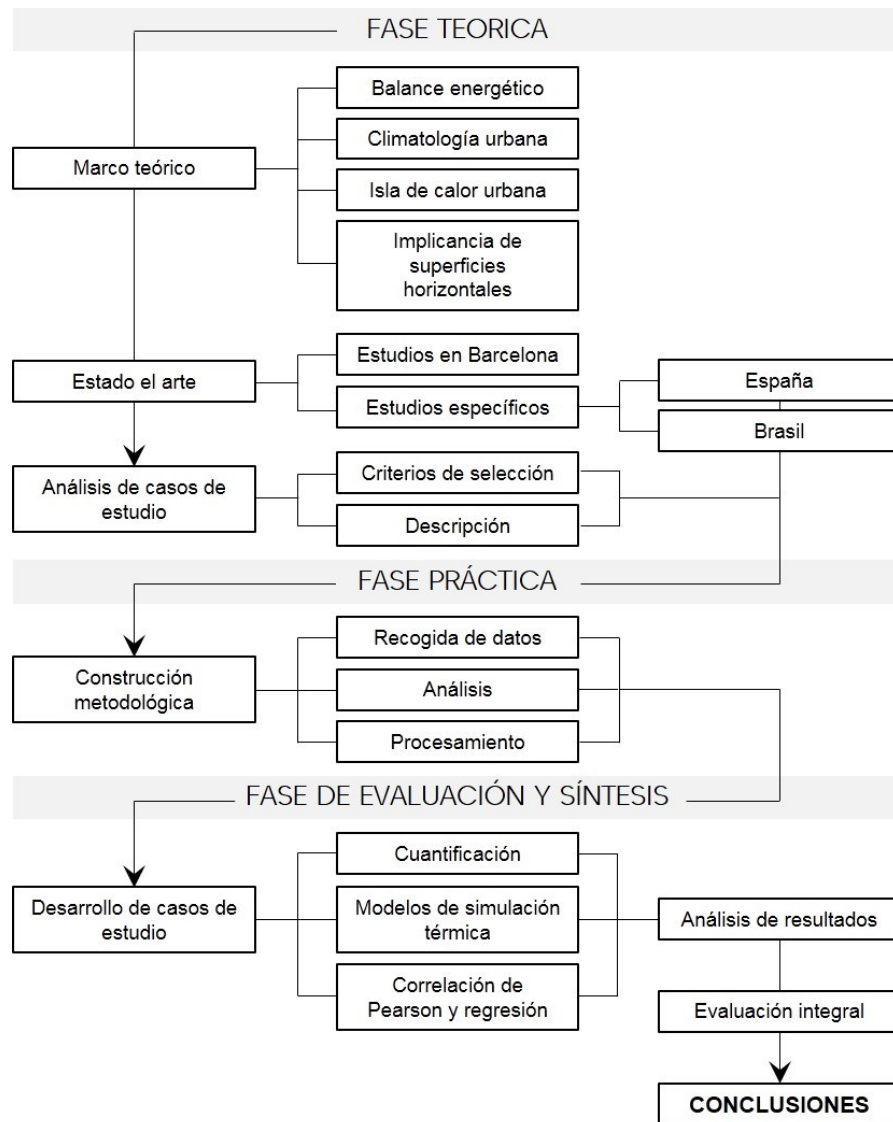
- Cuantificar la tipología de coberturas de superficies horizontales en el espacio público y determinar el *LST* incidente en condiciones de sombra y sol en el contexto de la morfología urbana inmediata.
- Registrar el comportamiento de las variables climáticas (*LSAT*, humedad relativa, velocidad de viento) del microclima urbano -de día y noche- en espacios públicos y representarlos mediante modelos de simulación.
- Registrar el comportamiento del *LST* del microclima urbano -de día y noche- en espacios públicos y representarlos mediante modelos de simulación desde los enfoques de tipología de coberturas y puntos de medición.
- Determinar las coberturas en superficies horizontales del espacio público que mayor radiación solar generan y su comportamiento -de día y noche- en dos contextos urbanos diferentes.
- Cuantificar las diferencias térmicas del *LST* del microclima urbano -de día y noche- en espacios públicos de dos contextos urbanos diferentes.
- Reconocer y comprobar las relaciones significativas de los indicadores calculados mediante teledetección y las variables morfológicas.
- Determinar las variables físicas de la morfología urbana en dos escenarios de la ciudad de Barcelona que tienen mayor incidencia sobre las variaciones de temperaturas urbanas.
- Señalar e identificar la relación de las variables morfológicas y climáticas sobre las temperaturas de superficies horizontales en el espacio público.
- Modelar el *LST* máxima alcanzada de día a una escala local, equivalente a 2.5m²/pixel, mediante la media del *LST* según tipología de coberturas registradas en campo.

1.2. Hipótesis

- La morfología y estructura urbana particulares de la ciudad de Barcelona (con variables: intensidad edificatoria, verticalidad, ancho de vías, *aspect ratio*), influyen directamente y de forma moderada en el comportamiento térmico en espacios públicos, mientras que el *LST* actúa indirectamente sobre *LSAT*, su influencia no es tan significativa.
- En dos contextos urbanos de variables físicas diferentes de la ciudad de Barcelona, el comportamiento del clima urbano en espacios públicos presenta notables diferencias térmicas, alcanzando mayores incidencias en el *LST* que en el *LSAT*.

1.3. Estructura

Figura 3: Esquema de la estructura



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

El marco de referencia para el estudio térmico de las superficies y el clima urbano en espacios públicos en la ciudad de Barcelona, pretende sostener la justificación temática de la presente investigación, en el que se exponen aspectos teóricos y conceptuales que han consolidado los campos mencionados hasta la fecha.

Por lo que este marco de referencia se presenta en tres partes: Primero, se abordan fundamentos del balance energético terrestre, la serie de componentes y proporciones que la configuran como los flujos de entrada y salida para mantener el equilibrio energético ideal; segundo, conceptos básicos de climatología urbana, el reconocimiento de sus escalas espaciales -tanto verticales como horizontales- y alcances de la características en el clima local y microclima; y tercero, aportaciones de la isla de calor urbana, conocer sus antecedentes y plantear un concepto general de atribuciones de diferentes autores a través de los años, tipos de temperaturas -tanto de superficie como atmosférica-, evaluar las propiedades de los materiales en superficies y sus aportaciones, así como, su implicancia en el confort térmico urbano.

2.1. El balance energético

El clima terrestre es un sistema climático¹ que es generado por la energía del solar, este sistema que está conformado por las superficies terrestres, océanos y atmósfera, absorbe aproximadamente en un año 340 W/m^2 .²

La atmósfera y el océano (conocido como “Motor térmico”), a través de varios procesos físicos como la evaporación de aguas superficiales, la convección, la lluvia, los vientos y la circulación oceánica, se encargan de compensar y distribuir de manera homogénea el calentamiento terrestre porque la energía solar incide más en la línea ecuatorial que en los extremos polares, debido que la Tierra tiene forma de esfera.

Asimismo, se señala que el motor térmico terrestre no solo cumple su función en el plano horizontal (distribuir energía desde ecuador hacia los polos) sino también en el vertical (conducir energía desde la superficie terrestre y atmósfera inferior hacia espacio); es así como, el calor terrestre se mantiene controlado y no se eleva indefinidamente. (NASA, 2009).

Por lo tanto, se conoce como “Balance energético de la Tierra”, al equilibrio entre los flujos de entrada de la energía radiante o radiación del Sol hacia la Tierra y los flujos de salida de la energía de la Tierra al espacio.

Y si por algún motivo o razón cambia alguna de las cantidades de los flujos, uno respecto al otro ya sea por fenómenos naturales o actividades antropogénicas, se produce un desequilibrio de la Tierra denominado “desequilibrio radiativo” En este caso, la temperatura de la Tierra se modificará, aumentando o disminuyendo, para obtener nuevamente el equilibrio. (NASA, 2017).

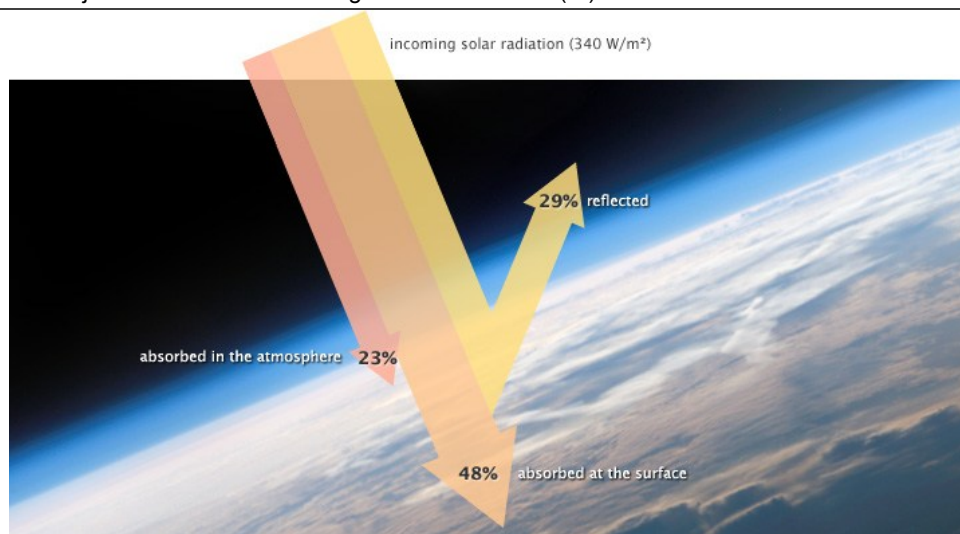
Los flujos de entrada de la energía radiante del sol suceden en 3 niveles –sólo el primero no alcanza el sistema terrestre–: el primero alcanza 29% el borde de la atmósfera y sale al

¹ Sistema climático: Es un sistema muy complejo que consta de cinco componentes: atmósfera, hidrósfera (océanos y reservorios de agua en forma líquida), criósfera (capas de hielo continental y marino, sobre y debajo de la superficie terrestre), superficie terrestre y biósfera (todas las formas de vida en el planeta - vegetal y animal-; y de las interacciones entre ellos. (IPCC, 2007, p.88)

² W/m^2 : Vatios de energía solar por m^2

espacio en el mismo porcentaje, el segundo retiene 23% en la atmósfera y sale en 59%, y el tercero 48% alcanza la superficie terrestre y sólo sale 12%. Esta información porcentual, recogida mediante observaciones satelitales directas, demuestra que en la superficie terrestre se produce mayor calentamiento y en la atmósfera, mayor enfriamiento. (NASA, 2009).

Figura 4: Flujos de entrada de la energía radiante del sol (%)



Fuente: Nasa, 2009

De la última premisa, se desprende la importancia de conocer a mayor detalle el balance energético superficial, es decir, el que ocurre a nivel de superficie terrestre (conformado por océanos y tierra). El flujo de salida en este nivel se realiza mediante tres procesos, cuya suma debe alcanzar el 48% de la energía radiante del sol de entrada, mencionado líneas arriba:

- Evaporación (25%). Proceso físico que ocurre a las moléculas de agua líquida, tras tener contacto con la energía solar, y pasar del estado líquido al gaseoso hacia la atmósfera.
- Convección (5%). Proceso natural de transferencia de energía solar de la superficie a la atmósfera, siendo más caliente cerca de las superficies y menos a mayores alturas.
- Emisión de energía térmica infrarroja (17%). Proceso mediante cual la energía solar sale como energía térmica infrarroja o calor al espacio. (NASA, 2009).

Sin embargo, ya se conocía que el flujo de salida superficial es de 12%, y no 48% como el flujo de entrada, mucho menor y generando un desequilibrio. La razón de que esto suceda se debe a que los dos primeros procesos -evaporación y convección- le transfieren su 25% y 5%, respectivamente a la atmósfera, y solo 12% del total de la emisión de energía térmica infrarroja irradia directamente al espacio.

Ante ello, del último proceso -emisión- queda un excedente de 5%, que también iría hacia la atmósfera, pero en este caso, sería atraído por gases de efecto invernadero natural³.

³ Gases de efecto invernadero: Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antrópico, que absorbe y emite radiación emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad da lugar al efecto invernadero. El vapor de agua-H₂O, el dióxido de carbono-CO₂, el óxido nitroso-N₂O, el metano-CH₄, el Ozono-O₃ son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. (IPCC, 2007, p.82)

Tabla 1: Flujos de energía solar de entrada y salida

	Nivel 1. Limite atmosférico	Nivel 2. Atmósfera	Nivel 3. Superficie terrestre
ENERGIA SOLAR ENTRANTE	29%	23%	48%
		25%	Por evaporación
		5%	Por convección
		5% *	12% Por emisión de energía térmica infrarroja
ENERGIA SOLAR SALIENTE	29%	59%	12%

Fuente: Elaboración propia con datos de la Nasa, 2009

En esta misma línea, del balance energético superficial, se observa diferencias de temperatura de superficie y de aire entre las áreas urbanas y rurales y cuyo motivo correspondería a la capacidad de absorción de la energía térmica de las superficies. Estas diferencias serían causadas principalmente por las coberturas de suelo, características de la superficie y nivel de actividad humana. (U.S. Environmental Protection Agency [U.S.EPA], 2008)

Así como la capacidad de absorción señalada previamente, las superficies irradiadas por energía solar están sujetas a características radiactivas particulares y diferentes como las que señala (Pal, 1998), y se detallan a continuación:

- Emisividad. Fracción emitida, entre la cantidad de energía emitida por la superficie y la cantidad total que incide sobre la superficie.
- Absorbencia. Fracción absorbida, entre la cantidad de energía radiante solar absorbida por la superficie y la cantidad total de energía que incide sobre la superficie.
- Reflectividad. Fracción reflejada, entre la cantidad de radiación reflejada y la cantidad total que incide sobre la superficie.
- Transmisividad. Fracción transmitida, entre la cantidad de radiación transmitida al medio del subsuelo⁴ y a la cantidad total que incide sobre la superficie.

A nivel urbano, el balance energético se plantea bajo *“la ecuación entre la radiación solar y atmosférica recibida, la radiación emitida por la superficie edificada y urbanizada, los diferentes flujos energéticos debidos a la actividad humana y el intercambio higratérmico propio de las masas vegetales y superficies ajardinadas”*. (Hernández, 2013:60)

Figura 5: Ecuación del balance energético superficial urbano

$$\pm Q_n = (Q_D + Q_d) (1-A) + Q_{L\downarrow} - Q_{L\uparrow} = \pm Q_S \pm Q_H \pm Q_E + Q_P$$

Q_n: balance de radiación neto
A: albedo del objeto de estudio
Q_D: radiación directa de onda corta
Q_d: radiación difusa de onda corta
Q_L: radiación de onda larga emitida por la atmósfera
Q_L: radiación de onda larga emitida por la superficie
Q_S: flujo de calor en la superficie procedente del suelo
Q_H: intercambio de calor sensible entre la superficie y la atmósfera
Q_E: intercambio de calor latente en la superficie
Q_P: flujo de calor producido por la actividad humana

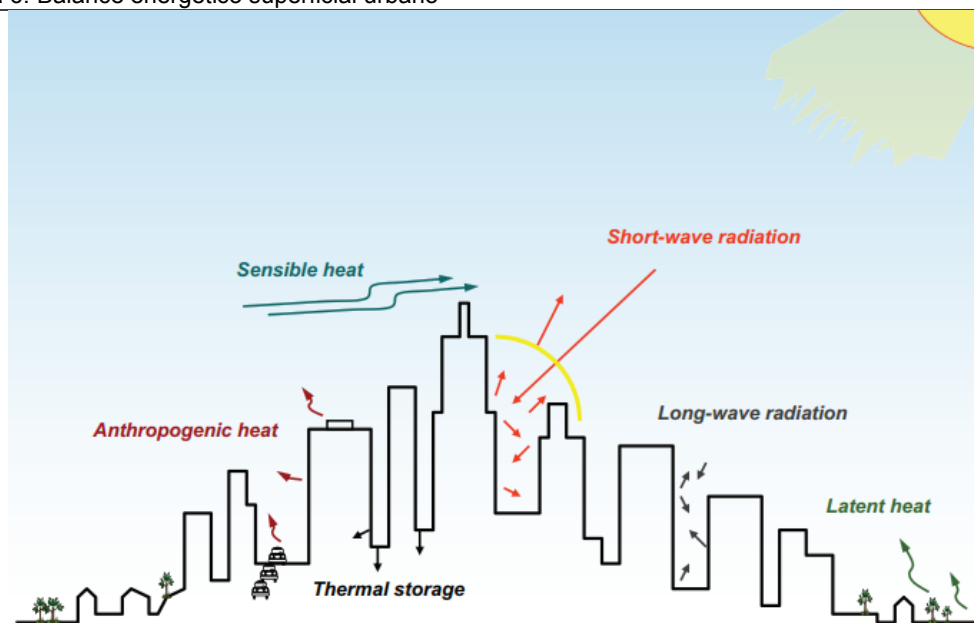
Fuente: Hernández, 2013, p.60

⁴ Subsuelo: Terreno que está debajo de la capa labrantía o laborable o, en general, debajo de una capa de tierra. (RAE, 2018)

Los principales elementos que involucran la ecuación son las siguientes:

- Albedo. Radiación solar que va a ser reflejada por las superficies a la atmósfera respecto a la que recibe, pero principalmente por el color, humedad y rugosidad. Es decir, mayor porcentaje de albedo, significa mayor radiación que es reflejada y no se queda concentrada por las superficies (Oke *et al.*, 2017).
- Radiación de onda corta. Se entiende como dos tipos de radiación de onda corta: primero al de la radiación solar de entrada -tanto directa como difusa- hasta la superficie, y segunda como la radiación solar de salida que es la fracción que va a ser reflejada en la superficie. Cuando la radiación solar tiene contacto con la superficie se denomina insolación y éste se puede medir con un solarímetro, por lo que, si se desea conocer una superficie en particular, se podría determinar a través de la insolación en el suelo. (Pal, 1998)
- Radiación de onda larga. Se entiende como dos tipos de radiación de onda larga: Radiación emitida por la atmósfera, sin nubes, y va a depender de las temperaturas, humedad y dióxido de carbono. Y segunda, la radiación emitida por la superficie que es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura de la superficie en unidades absolutas. De las dos mencionadas, la segunda va a presentar mayor variación diurna, con un valor máximo al inicio de la tarde y un valor mínimo al amanecer. (Pal, 1998)
- Calor sensible. Transformación de la radiación solar que incide y es absorbida por las superficies urbanas, es decir sensación de temperatura (Tumini, 2010; U.S.EPA, 2008)
- Calor latente. Transformación de la radiación solar que incide y es absorbida por las superficies urbanas, es decir sensación de humedad. (U.S.EPA, 2008)
- Evapotranspiración. Transferencia del calor latente de la superficie al aire, a través de la evaporación del agua (U.S.EPA, 2008). No obstante, en áreas urbanas la evapotranspiración es menor por contar con pocas superficies permeables como parques y jardines, así también estas superficies impermeables influyen en la mayor escorrentía (Hernández, 2013).
- Almacenamiento térmico. Retención de la radiación de onda corta en zonas urbanas causado a la baja reflectancia solar de las superficies, materiales de construcción y geometría urbana. (U.S.EPA, 2008)
- Calor de la actividad humana o antropogénico. Calor generado por actividades o fuentes creadas por el hombre. (U.S.EPA, 2008)

Figura 6: Balance energético superficial urbano



Fuente: U.S.EPA, 2008, p.11

2.2. Climatología urbana

Al referirse al clima, es necesario comprender que este se refiere a la descripción del patrón del tiempo a largo plazo de un área en particular, por su parte algunos científicos definen el “largo plazo” al periodo de más de 30 años. Para esto, es necesario analizar la media de precipitaciones, temperaturas, humedad relativa, radiación solar, condiciones del viento, niebla y otros que incidan en el comportamiento atmosférico y cumplan las condicionantes de tiempo y espacio.

Asimismo, la ciencia que lo estudia es la climatología y es relevante su estudio porque las actividades humanas han generado cambios y variaciones en el clima (conocido como influencia antrópica o antropogénica), y esto afecta a todo el mundo (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2005).

En el contexto urbano, las actividades humanas refieren a los actos realizados por el hombre como la construcción de: edificaciones, vías, áreas de estacionamiento, industrias y otros, y son los que modifican el clima con el que interactúa (Giovany, 1989).

Por lo tanto, Oke (2005) señala que el clima urbano estudia las interacciones entre la atmósfera y las ciudades, incluido el impacto de la atmósfera a: las personas, infraestructuras, actividades, así como los efectos de éstos a la atmósfera (Oke, 2005), es decir los impactos que generan las áreas urbanizadas en el clima y viceversa en todas sus escalas (Mills, 2014).

2.2.1. Escalas espaciales del clima urbano

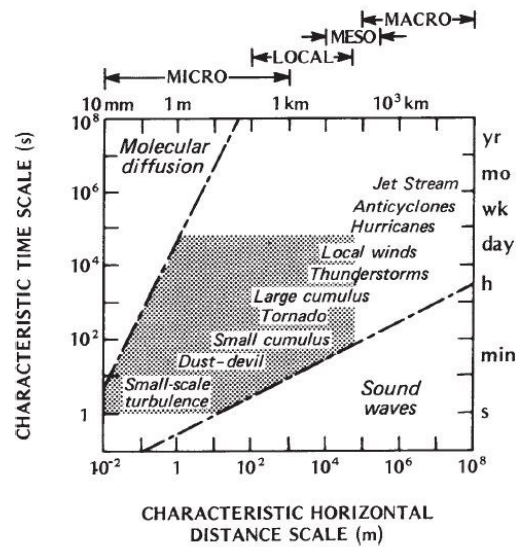
En las áreas urbanas, las superficies se caracterizan por ser heterogéneas debido a las diferentes coberturas del suelo, densidad de las edificaciones y forma de apropiación del espacio, principalmente; por ende, el balance de energía podría alterarse, resultando necesario conocer las escalas espaciales para el enfoque propio del estudio. Para ello se considera las características atmosféricas -fenómenos atmosféricos- (específicamente los relacionadas al movimiento) sobre extensiones horizontales y verticales.

2.2.1.1. Escalas horizontales

Las escalas horizontales se plantean por Oke (1978) en el marco de un cuadrante cuyos límites son el espacio y tiempo, en el que considera 4 escalas.

- Microescala. Refiere a la zona inmediata desde 10mm (1cm) hasta 1km con fenómenos característicos como remolinos de polvo y pequeñas turbulencias. El estudio del clima se denomina “Microclima”.
- Escala local. Refiere a la extensión de una localidad desde 100m hasta 50km y se caracteriza por fenómenos como tornados y pequeñas acumulaciones de nubes. El estudio del clima se denomina “clima local”.
- Mesoescala. Refiere a una región desde 10km hasta 200km con fenómenos característicos como vientos locales, tormentas eléctricas y grandes acumulaciones de nubes. El estudio del clima se denomina “mesoclima”.
- Macroescala. Refiere a nivel de continente con una extensión mayor a 100km y con fenómenos característicos como chorros de aire rápido, huracanes y anticiclones. El estudio del clima se denomina “macroclima”.

Figura 7: Escalas horizontales en relación a características de tiempo y espacio



Fuente: Oke, 1978, p.4

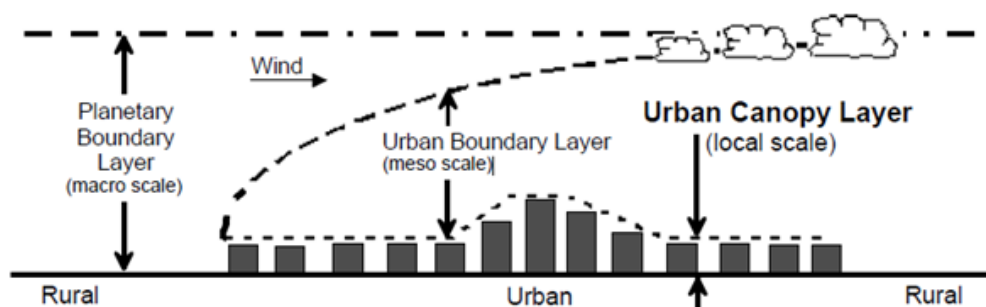
*El área sombreada señala las características atmosféricas dominantes en la capa límite urbana - UBL

2.2.1.2. Escalas verticales

Las escalas verticales, también planteadas por Oke (1978,1984), determinan la clasificación urbana en dos capas: “capa de dosel urbano” (*UCL*⁵) que inicia desde el nivel de suelo hasta el nivel de techos de edificios donde se observa claramente las distintas densidades de edificaciones, pero sobre todo, las de alta densidad; y “capa límite urbana” (*UBL*⁶) que inicia desde el límite superior de la capa de dosel urbano hasta la altura en que todavía la superficie tiene cierta influencia perceptible.

Por su parte, Harman (2003) afirma que estas escalas están estrechamente relacionadas, en el sentido que, si en una escala espacial se desarrollan ciertos procesos físicos, éstos pueden afectar o influenciar otras escalas; tanto de escalas más pequeñas a las más grandes, y viceversa.

Figura 8: Clasificación de las capas verticales urbanas



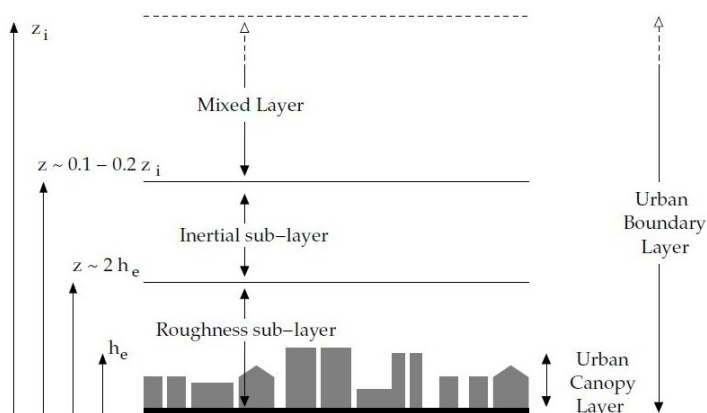
Fuente: Moreno, 1993, p.20

⁵ *UCL*: Urban Canopy layer, término en inglés.

⁶ *UBL*: Urban boundary layer, término en inglés.

Sin embargo, la capa límite urbana es el conjunto de otras capas límites internas debido a la distinta estructura urbana y densidades de edificaciones, como se menciona previamente, y de los impactos que genera en la ciudad.

Figura 9: Esquema de las escalas espaciales urbanas en capas y subcapas



Fuente: Roth, 2000, p.5

Por lo que se considera dentro de la capa límite urbana, 3 subcapas desde el punto de vista de flujos de aire respecto a la altura -turbulencia- (Garratt, 1992), las que se detallan de la siguiente manera:

- Capa mixta (ML^7). A pesar que no se conoce tanto de las capas mixtas y menos las diferencias entre urbanas y rurales, señala que presentan turbulencias y que éstas serían independientes a la rugosidad de las superficies.
- Sub capa de flujos constantes (CFL^8). Conocida también como sub capa interfacial y en áreas urbanas el conocimiento es limitado debido a que la altura de las torres de medición no alcanzan a esta subcapa. En el plano horizontal la temperatura de flujos es homogénea, pero en el vertical podrían ser diferentes; respecto a la humedad del calor es horizontalmente homogénea y del mismo modo en la vertical. No obstante, es probable que, tras someterse a condiciones inestables, la subcapa de rugosidad alcance la profundidad potencial por completo de esta capa y ya no exista. (Oke *et al.*, 1989).
- Sub capa de rugosidad (RSL^9). Conocida también como capa de transición, interfacial o de estela, en la que se incluye la capa de canopia urbana. Se caracteriza por estar en contacto con el componente de rugosidad de las superficies, tanto al encontrarse adyacente a este tipo de superficies y este tipo de elementos modifica el flujo del aire. Este flujo se distribuye en el plano horizontal de forma heterogénea y va a estar definido por la altura (H), separación o forma de las edificaciones (W).

Cabe acotar, que Oke (1987) señala, si la relación $(H/W) < 4$, se genera turbulencia o vórtices aislados denominado Flujo de rugosidad aislada (figura10, a), si la relación (H/W) alcanza a 7, se genera vórtices turbulentos entre los edificios denominado Flujo

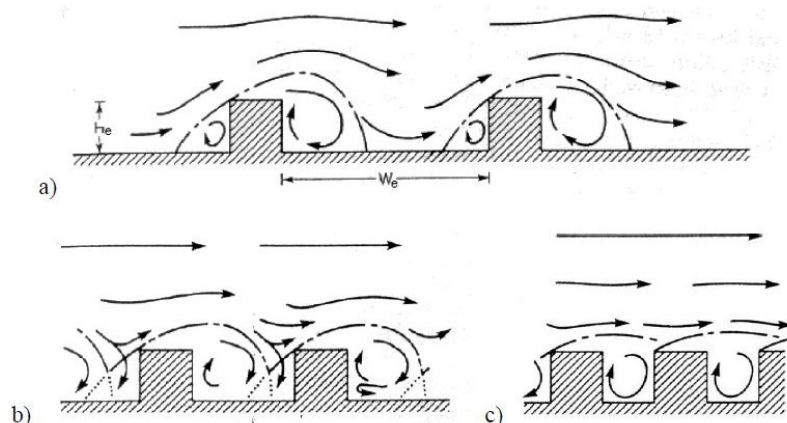
⁷ ML : Mixer layer, término en inglés.

⁸ CFL : Constant-flux layer, término en inglés.

⁹ RSL : Roughness sub-layer, término en inglés.

de interferencia (figura 10, b) y si la relación $(H/W) > 7$, presenta flujos de aire independientes denominado Flujo de skimming o rasante (figura 10, c).

Figura 10: Flujos asociados con el flujo de aire sobre las matrices de edificios



Fuente: Oke, 1988, p.5

Asimismo, el flujo de aire difiere y es interrumpida por las edificaciones debido a las diferentes configuraciones urbanas que presentan las ciudades.

2.2.2. Características en el clima local

Las ciudades han ido artificializando las áreas naturales tanto por la construcción de edificaciones como de superficies pavimentadas, asimismo la liberación de calor de las personas y de sus actividades que desarrollan generan que el balance de energía y radiación de las superficies se alteren. De este modo, las ciudades se vuelven más cálidas reteniendo más calor. (Oke, 1982)

2.2.2.1. Local climate zones o Zonas climáticas Locales

Hasta el 2011 se entendía al clima desde dos puntos de vista generales: clima urbano y clima rural, por lo que Stewart y Oke (2012) plantean una clasificación climática más próxima, a escala local, para que pueda ser aplicada de modo universal a través de la denominación Zonas Climáticas Locales (LCZ¹⁰), asimismo, señalan que no buscan reemplazar los términos de urbano ni rural, pero sí uniformizar la descripción de las terminologías.

Existen diversas definiciones de estos dos términos (urbano y rural) y los autores resumen los conceptos en los siguientes: “paisajes rurales” a las áreas menos pobladas y menos estructuras edificadas comparadas a las ciudades, con más espacios naturales para el uso de actividades primarias como la agricultura; “paisajes urbanos” a espacios con considerables áreas construidas y mayor cantidad de población y “paisajes suburbanos” a espacios ubicados a las afueras y adyacente a las áreas o paisajes urbanos con menos población respecto a los paisajes urbanos. En 2006 (Stewart y Oke) afirman que estos términos eran muy superfluos para posteriores análisis científicos.

Los dos objetivos que esperan alcanzar con esta clasificación climáticas son: a) *Facilitar documentación consistente de los metadatos del sitio y por tanto mejorar la base de*

¹⁰ LCZ: Local climate zones, término en inglés.

comparaciones entre sitios y b) proporcionar un protocolo objetivo para medir la magnitud del efecto de isla de calor urbano en cualquier ciudad, o en palabras exactas:

“to facilitate consistent documentation of site metadata and thereby improve the basis of intersite comparisons, and to provide an objective protocol for measuring the magnitude of the urban heat island effect in any city.” (Stewart & Oke, 2012, p.1880)

En este sentido, plantean categorizarlo en 17 zonas climáticas locales con analizadas bajo tres indicadores: “locales” a escala real, “climáticas” propias de su naturaleza y “zonas” referido a un espacio limitado -cientos de metros a varios kilómetros en la escala horizontal- que se caracteriza por su cobertura de suelo, estructura, materiales y actividades humanas uniformes. En esta misma línea, se puede desglosar en 15 zonas climáticas locales definidos por la estructura, superficie, cubierta y las 2 zonas climáticas locales restantes por materiales de construcción y emisiones antrópicas de calor. (Stewart & Oke, 2012)

Cada zona climática local tiene valores de propiedades como: Ratio de aspecto (AR)¹¹, Factor de vista de cielo (SVF)¹², fracción de la superficie edificada, fracción de superficie permeable, altura de elementos rugosos y densidad del calor antropogénico) que califican a cada una, siendo únicas.

Figura 11: Valor de las propiedades de *Local Climate Zones*

Local climate zone (LCZ)	Aspect ratio ^a	Sky view factor ^b	Building surface fraction ^c	Impervious surface fraction ^d	Height of roughness elements ^e	Anthropogenic heat flux density ^f
LCZ 1 Compact high-rise	>2	0.2–0.4	40–60	40–60	>25	50–300
LCZ 2 Compact mid-rise	0.75–1.5	0.3–0.6	40–70	30–50	8–20	<75
LCZ 3 Compact low-rise	0.75–1.5	0.2–0.6	40–70	20–40	3–8	<75
LCZ 4 Open high-rise	0.75–1.25	0.5–0.7	20–40	30–40	>25	<50
LCZ 5 Open mid-rise	0.3–0.75	0.5–0.8	20–40	30–50	8–20	<25
LCZ 6 Open low-rise	0.3–0.75	0.6–0.9	20–40	20–40	3–8	<25
LCZ 7 Lightweight low-rise	1–2	0.2–0.5	60–90	<10	2–4	<35
LCZ 8 Large low-rise	0.1–0.3	>0.7	30–50	40–50	3–10	<50
LCZ 9 Sparsely built	0.1–0.25	>0.8	10–20	<20	3–8	<10
LCZ 10 Heavy industry	0.2–0.5	0.6–0.9	20–30	20–40	5–15	>300
LCZ A Dense trees	>1	<0.4	<10	<10	3–30	0
LCZ B Scattered trees	0.25–0.75	0.5–0.8	<10	<10	3–15	0
LCZ C Bush, scrub	0.25–1.0	>0.9	<10	<10	<2	0
LCZ D Low plants	<0.1	>0.9	<10	<10	<1	0
LCZ E Bare rock or paved	<0.1	>0.9	<10	>90	<0.25	0
LCZ F Bare soil or sand	<0.1	>0.9	<10	<10	<0.25	0
LCZ G Water	<0.1	>0.9	<10	<10	—	0

^aMean height-to-width ratio of street canyons (LCZs 1–7), building spacing (LCZs 8–10), and tree spacing (LCZs A–G).

^bRatio of the amount of sky hemisphere visible from ground level to that for an unobstructed hemisphere.

^cProportion of ground surface with building cover (%).

^dProportion of ground surface with impervious cover (rock, paved) (%).

^eGeometric average of building heights (LCZs 1–10) and tree/plant heights (LCZs A–F) (m).

^fMean annual anthropogenic heat flux density ($W m^{-2}$) at the local scale. Varies significantly with latitude, season, and population density.

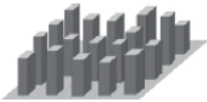
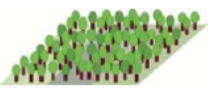

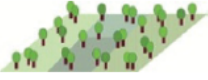

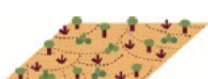



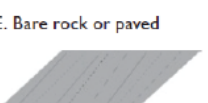


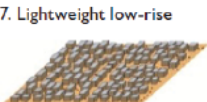

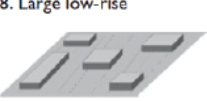

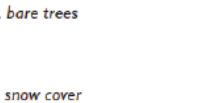

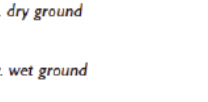
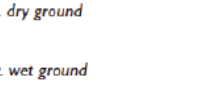
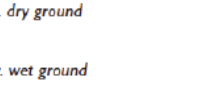
Fuente: Stewart & Oke, 2012, p.1886

Finalmente, en la figura 11, de manera general se observa la clasificación de estas zonas climáticas locales en 2 grupos: “*Built types* o Tipos construidos” categorizados desde 1 al 10 con características de construcción relacionadas a la distribución de árboles en zonas abiertas y “*Land cover types* o Tipos de cubierta de superficies” categorizados desde A al G con características de las coberturas de tierra en dos rangos de tiempo: estacional y efímera. (Stewart & Oke, 2012)

¹¹ AR : Aspect ratio, término en inglés.

¹² SVF : Sky view factor, término en inglés.

Figura 12: Características de *Local Climate Zones*

Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees 	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
2. Compact midrise 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees 	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
3. Compact low-rise 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub 	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
4. Open high-rise 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants 	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
5. Open midrise 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved 	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
6. Open low-rise 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand 	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
7. Lightweight low-rise 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water 	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
8. Large low-rise 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
9. Sparsely built 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	b. bare trees 	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
10. Heavy industry 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	s. snow cover 	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		d. dry ground 	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground 	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Fuente: Stewart & Oke, 2012, p.1885

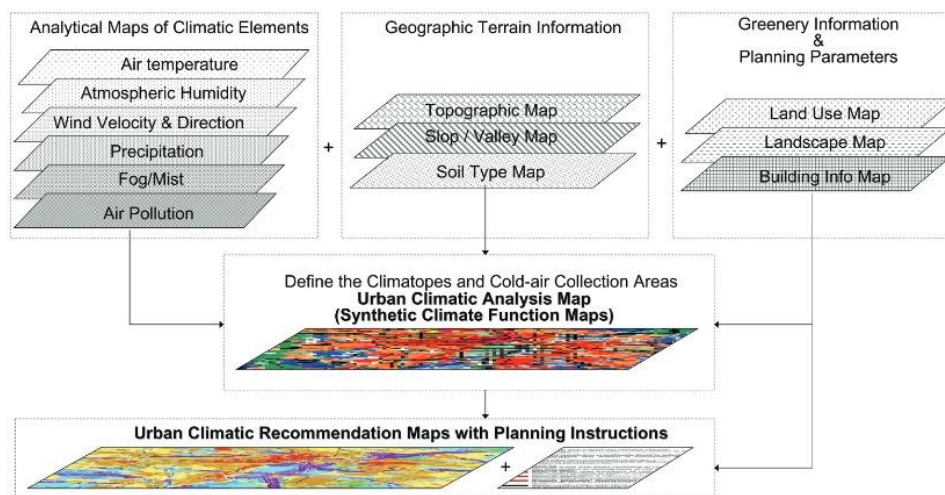
2.2.2.2. The Urban climatic maps o Climatopes

Por otra parte, mediante *The urban climatic maps – UCMaP*, quien es propuesto por Knoch en 1951 para fines de planificación, desarrollado por investigadores alemanes desde 1970s (Matzarakis, 2005) y cuyos estudios se han ido extendiendo por Europa, Asia y Sudamérica, alcanzando 15 países en el mundo (Ren *et al.*, 2011); una

herramienta de evaluación que involucra factores del climáticos y planeamiento urbano representando los fenómenos climáticos. Éstas son representadas en mapas de dos dimensiones para el estudio de diferentes escalas; regional, urbano y local. (Baumuller *et al.*, 1992; The association of German Engineers [VDI], 1997)

Los UCMMap está conformada por dos componentes: *the UC-AnMap*, que representa la evaluación climática y de asentamientos según diferentes categorías y *the UC-ReMap*, que incluye instrucciones de planificación desde el punto de vista del clima urbano. (Ren *et al.*, 2011)

Figura 13: Estructura de *Urban Climatic Maps*



Fuente: Ren *et al.*, 2011, p. 2216

Asimismo, igual que los LCZ, éstos se caracterizan y categorizan por compartir características climáticas similares; mientras que las principales diferencias inciden en las temperaturas diarias, rugosidad vertical, topografía, uso del suelo y actividades predominantes. Por lo tanto, las últimas al ser las más relevantes, éstas van a definir los términos de los climatopes. (VDI, 1997)

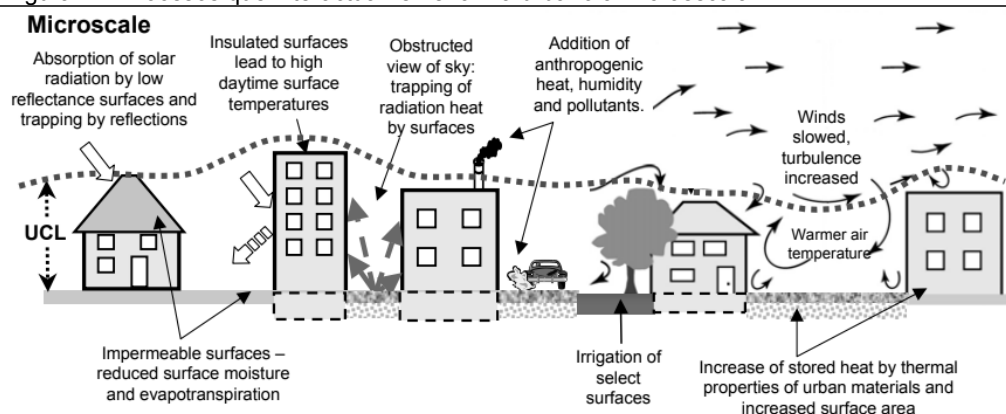
- **Water climatope:** Compuesto por grandes cuerpos de agua que tienen un efecto térmico equilibrante en sus alrededores, se caracterizan por estar expuesto a alta humedad y exposición al viento. Asimismo, las temperaturas del aire en verano son más bajas que en sus alrededores durante el día y más altas durante la noche.
- **Open land climatope:** Compuesto por grandes prados y áreas agrícolas, así como terrenos abiertos que solo están escasamente arbolados, e caracteriza por generar una fuerte intensidad de aire fresco y frío durante la noche.
- **Forest climatope:** Compuesto por bosques y áreas forestales, cuyo dosel de árboles actúa como un filtro de contaminantes y se les califica como zonas de regeneración para el aire y las personas.
- **Greenbelt climatope:** Conformado por espacios verde en áreas urbanas como parques, éstos tienen efectos de equilibrio en su entorno desarrollado y representando áreas de compensación frescas con una alta humedad en contraste con el entorno cálido.
- **Garden climatope:** Comprende áreas urbanizadas con desarrollo abierto (1-3 plantas) y numerosos espacios verdes, cuyos elementos climáticos se encuentran afectados ligeramente.

- *City periphery climatope*: Determinado por edificios individuales más densos, casas adosadas o desarrollo perimetral con espacios verdes (máximo de 3 plantas) o por edificios separados con espacios verdes (máximo de 5 plantas)
- *City climatope*: Zonas urbanas de varios pisos con pocos espacios verdes y bloques de torres independientes.
- *Core city climatope*: Zona urbanas densas en el centro de la ciudad, con solo unos pocos espacios verdes, conducen a un fuerte calentamiento durante el día y a la formación de la isla de calor durante la noche.
- *Commercial climatope*: Compuesto por zonas comerciales y negocios con características son amplias vías de acceso y espacios de estacionamiento, así como un aumento de las emisiones.
- *Industry climatope*: En zonas industriales, similar al centro urbano, pero con grandes áreas de circulación y con emisiones mayores.
- *Rail climatope*: Las ubicadas en ejes ferroviarios que ocupa ancho de 50m, y se caracteriza por un calentamiento intenso durante el día y un enfriamiento rápido por la noche. Pero la temperatura de la superficie es más alta que en tierra abierta.

2.2.3. Características en el microclima

El clima urbano a la microescala, puede alterarse significativamente en pequeñas distancias, debido que está asociado directamente a procesos atmosféricos y a actividades urbanas como consecuencia de planteamientos urbanos, cuyas características involucran: ancho y orientación de vías, edificaciones, parques entre otros. (Voogt, 2007)

Figura 14: Procesos que interactúan en el clima urbano a microescala



Fuente: Voogt, 2007

El microclima está relacionado a las consecuencias del aumento de temperatura en el entorno urbano, pero depende de la intensidad del UHI y las características urbanas de su contexto inmediato, sin embargo, a pesar que cada ciudad presente condiciones climáticas muy características a la región donde se emplace, se identifica características generales (Tumini, 2012):

- Aumento de las temperaturas -mayormente en la mínimas- por lo que, reduce el efecto de enfriamiento en la noche.
- Reducción de la amplitud térmica y modificación de horas pico con mayor radiación térmica.
- Variación de flujo y distribución de vientos, por presencia de edificaciones e intensidad de temperaturas en superficies.
- Variación de precipitaciones en cantidad e intensidad, reduciendo la evapotranspiración.

2.3. Isla de calor urbana

2.3.1. Antecedentes

La percepción del clima urbano es muy antigua (López *et al.*, 1993) pero hace casi 200 años ya se realizaban más aproximaciones al tema con las observaciones meteorológicas mediante aparatos que determinan las variaciones del clima por crecimiento de la ciudad, realizadas por Howard en Londres (1833) y luego por Renou en París (1862 y 1868).

La obra de Howard es la que representa el inicio en la investigación en el clima urbano, su investigación consiste, desde 1806 a 1830, en realizar registros y observación de la presión, temperatura, humedad relativa y precipitaciones de zonas periféricas de Londres porque su único y principal interés era el clima de la ciudad, pero desde el punto de vista de Londres. Por lo que, visto la desviación entre sus grabaciones y las reunidas por la Royal Society de Londres, reconoce y concluye: que existía una diferencia de temperaturas entre la media y de la parte más densa de la metrópoli, una variación durante el año, es mayor en invierno y predomina en la noche (Mills, 2009), es decir, identifica la isla de calor, pero aún no recibía esa denominación propiamente.

La moderna climatología urbana es relativamente nueva (Kratzer, 1937), y es reconocida como subcampo hace 80 años (Oke, 2005) al considerar una nueva y novedosa metodología fundamental. Este nuevo método incluye uso de vehículos a motor para realizar mediciones en toda la ciudad y alrededores a través de transectos previamente diseñados, que permiten registrar temperaturas más precisas y después se utilizados para elaboración de perfiles térmicos o ser representados espacialmente en mapas de isotermas, y es realizado por Schmidt en Viena.

Por tanto, las tres obras clásicas de la literatura científica incluyen El clima de Londres o “*The Climate of London*” de Luke Howard en 1833, El clima de las ciudades o “*The Climate of Cities*” de Albert Kratzer en 1937 y 1956 -que sería la primera obras síntesis- El clima de Londres (*The Climate of London*) también en 1956 (Fernández, 2016).

Años después, específicamente tras la segunda guerra mundial, se incrementa las investigaciones sobre el clima urbano, y más en ciudades de Estados Unidos, Japón y otros europeos. La obra de Chandler sobre el clima de Londres en 1965 se convierte como referente de la historia del clima urbano, la obras de Landsberg en 1981 como un excelente compendio del tema, y obras de Oke -sus destacables manuales de: climas de la capa límite en 1978 o clasificación de zonas climáticas locales en 2012 junto a Stewart- que hasta la fecha son múltiples. (Moreno, 1999)

Actualmente, la climatología urbana está consolidada dentro del campo de la climatología, a pesar de ser una las más recientes, cuenta con una literatura muy sustancial que ha permitido cada vez más aproximaciones. Si bien en sus inicios, las investigaciones desarrolladas presentaban cada vez mejores metodologías para la precisión de los registros en campo, hoy en día este campo es el medio u herramienta que contribuye al planeamiento urbano más racional, como mitigar o eliminar variaciones o diferencias climáticas, mejor calidad ambiental y confort urbano. Es decir, que dentro de la ciudad -a nivel de distritos y barrios- las condiciones confort son diferentes a las de la región, debido que la intervención del hombre en el territorio no es uniforme. (Arroyo & Fernández, 1991)

2.3.2. Definición y aportaciones

La isla de calor urbana, se entiende como el fenómeno referido a la diferencia de temperaturas de la ciudades y pueblos en relación a su inmediato contexto natural o rural (Oke, 1978; Moreno, 1997) y el primero en utilizarlo fue Gordon Manley en 1958 (Moreno, 1997). Desde entonces, hubo una gran cantidad de investigaciones sobre el tema, hasta los años 80, en los que hubo una ligera estabilización en publicaciones (Carreras *et al.*, 1990); reconociendo que: “*las investigaciones de Tim Oke son sinónimo de la historia moderna de la investigación del clima urbano*” (Mills, 2009, p.1). Las posteriores investigaciones en el campo del clima urbano iniciaron exploraciones respecto a las variaciones locales en las propiedades atmosféricas, como la temperatura del aire.

El indicador de la influencia y alcance de la isla de calor urbana es la intensidad y este último es el que va a definir su alcance en sus escalas horizontales y verticales debido a que su distribución está relacionada con las características térmicas de los componentes físicos de áreas edificadas, su extensión territorial y su densidad de edificación. (Oke, 1973)

2.3.3. Tipo de temperaturas

La diferencia de temperaturas, que caracteriza a la isla de calor urbana, se presenta en el aire y en la superficie. La ‘isla de calor urbana de la superficie’ se genera por las altas temperaturas de superficie de suelo (*LST*)¹³ debido a los materiales de suelo y envolvente de edificaciones, y la ‘isla de calor urbana del aire’, por las altas temperaturas de aire en la superficie del suelo (*LSAT*)¹⁴ debido a las diversas alturas de las capas de la atmósfera más próximas a la superficie. (U.S.EPA, 2008). La tabla 2 muestra las características básicas de la isla de calor de superficie y del aire, esta información no refiere a un área en particular.

Tabla 2: Características básicas del *Land surface temperature* y *Land surface air temperature*

	LAND SURFACE TEMPERATURE - LST	LAND SURFACE AIR TEMPERATURE - LSAT
<i>Desarrollo temporal</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presente durante todas las horas diurnas y nocturnas. ▪ Mayor intensidad durante el día del verano. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Poco o casi inexistente durante las horas diurnas. ▪ Mayor intensidad durante la noche del invierno.
<i>Intensidad máxima (Condiciones más intensa de la Isla de calor urbana)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor variación espacial y temporal: ▪ Día: 10 a 15 °C ▪ Noche: 5 a 10 °C 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor variación: ▪ Día: -1 a 3 °C ▪ Noche: 7 a 12 °C
<i>Método de identificación típico</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medición indirecta: ▪ Teledetección 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Medición directa: ▪ Estaciones meteorológicas ▪ Transectos móviles¹⁵
<i>Representación típica</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Imagen térmica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mapa de isoterma ▪ Gráfico de temperatura

Fuente: U.S.EPA, 2008, p.2

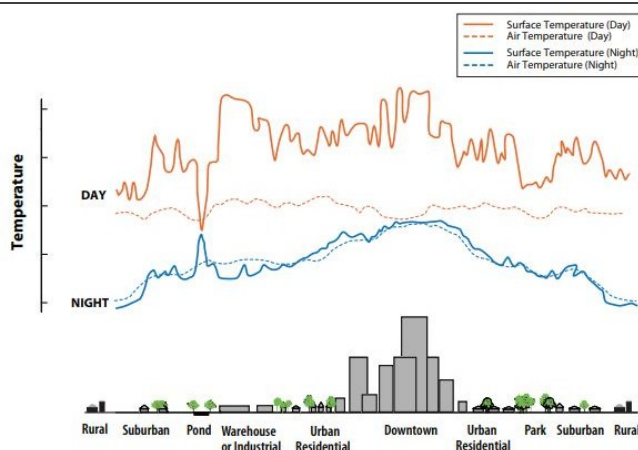
¹³ *LST*: Land Surface temperature, término en inglés.

¹⁴ *LSAT*: Land Surface air temperature, término en inglés.

Por otra parte, a pesar que estos dos tipos de temperatura -*LST* y *LSAT*- se enmarcan en la capa de dosel urbana, no tienen una relación directa entre ellas; pero, aun así, la temperatura de superficie tiene una influencia significativa en la temperatura de aire. Esto puede afirmarse con el siguiente ejemplo: el efecto de frío que generan las áreas con vegetación (como son los parques) en la temperatura de aire de las ciudades o áreas construidas.

Asimismo, la temperatura de superficie de un área no es constante en el tiempo -por los diversos usos de la tierra que presenta- respecto a la temperatura de aire, que se relaciona con la atmósfera; ambas temperaturas difieren durante el día, pero se aproximan durante la noche. (U.S.EPA, 2008) El diagrama de variaciones de temperaturas a continuación, no muestra temperaturas reales de algún caso particular, pero ayuda a comprender sus comportamientos de día y noche a lo largo de la densidad construida de la zona urbana hasta la rural. Cabe resaltar que las fuentes de agua son las únicas que mantienen temperaturas de superficie constantes tanto de día y de noche.

Figura 15: Variaciones de día y noche del *Land surface temperature* y *Land surface air temperature*



Fuente: U.S.EPA, 2008, p.4

2.3.4. Enfoque de las coberturas en superficies

En este sub apartado se pretende conocer los principales factores humanos y de la misma naturaleza que influyen al *UHI* para luego abordar la influencia significativa de las coberturas de las superficies que caracterizan a las áreas urbanizadas o artificializadas a través de una descripción breve de sus diferentes características térmicas.

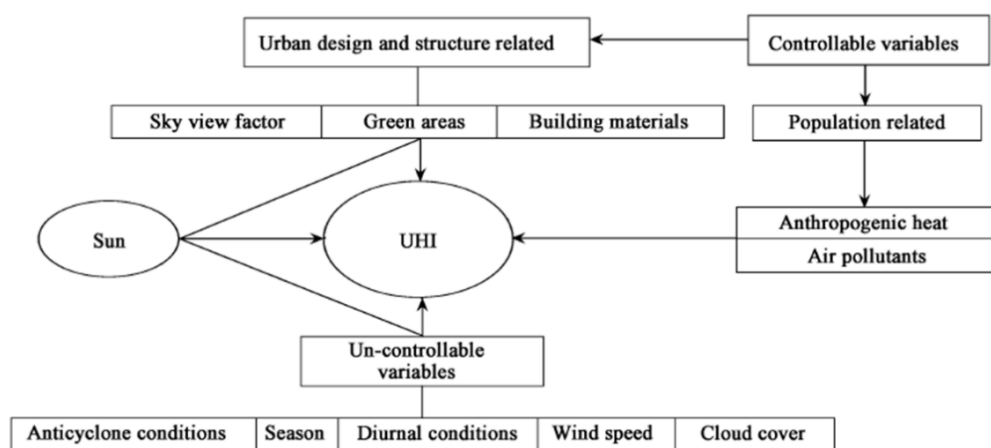
Existen diversos factores, de modo general, que contribuyen a la generación de Isla de calor urbana y pueden dividirse en dos grupos: controlables y no controlables. No es difícil suponer que éstas refieren a: el ser controladas por el ser humano; por lo que el primero considera a las variables climatológicas caracterizadas por su temporalidad: velocidad y dirección del viento, humedad cubierta de nubes y otros, y la segunda considera variables del diseño-estructura urbana y población caracterizadas por su constancia o permanencia: áreas verdes, materiales de construcción, factor vista de cielo y calor antropogénico.

La radiación del sol va a ser el factor principal y constante en este proceso. (Rizwan *et al.*, 2008). Por lo que es importante conocer y realizar mayores aproximaciones a los factores controlables debido que éstas pueden ser manejadas por las autoridades locales a través de mejor toma de decisiones futuras.

Las estructuras urbanas a nivel de suelo como superficies verticales (paredes y techos) y superficies horizontales (áreas pavimentadas y verdes) absorben radiación solar en diferentes grados y almacenan como energía térmica durante las horas diurnas. Sin embargo, a medida que se aproxima la noche estas estructuras se van enfriando y también el entorno próximo a éstas últimas.

Cabe resaltar que el efecto de enfriamiento mencionado previamente es heterogéneo, es decir que va a variar a lo largo de las estructuras urbanas, y ello principalmente por el factor de vista de cielo y materiales particulares (Rizwan *et al.*, 2008).

Figura 16: Esquema de variables controlables y no controlables en la generación del UHI



Fuente: Rizwan *et al.*, 2008, p.2

El desarrollo de esta investigación se enfoca en las superficies horizontales del espacio urbano público, por ello es necesario ampliar mayores conocimientos sobre los materiales de cobertura -permeables como impermeables- en el clima urbano y su aportación a la isla de calor urbana.

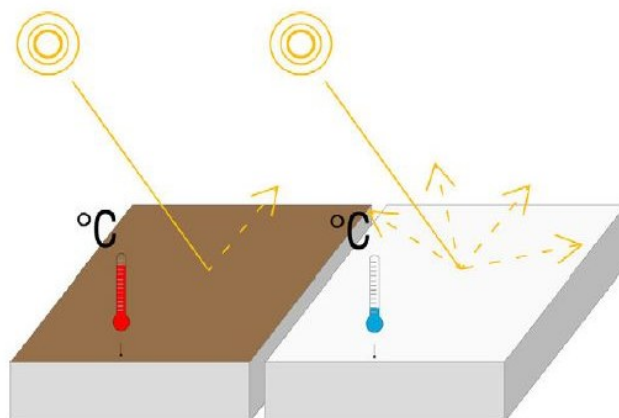
Conocer cómo refleja, emite y absorbe la energía solar sobre las superficies, son las propiedades más relevantes que influyen en la generación de islas de calor urbana, y se analizarán a través de tres propiedades (las dos primeras como propiedades radiativas y la tercera, como térmica): la reflectancia solar, la emisividad y la capacidad térmica. (U.S.EPA, 2008; Hernández, 2013)

▪ Propiedades radiativas

- Reflectancia solar. También denominado “Albedo” y es el principal determinante de la temperatura de superficie, se define como el porcentaje de energía solar reflejada por una superficie. Está correlacionada con el color de un material (U.S.EPA, 2008, p.8).

Es decir, mientras más oscuro es el color del material, el valor de reflectancia o albedo es más bajo; caso contrario con los colores claros que tiene alta reflectancia o albedo como la pintura blanca (valor: 0.7-0.9), de la tabla 3. Asimismo, la norma general señala que la reflectancia solar es proporcional al ángulo de incidencia solar.

Figura 17: Albedo y temperatura de superficie de los materiales

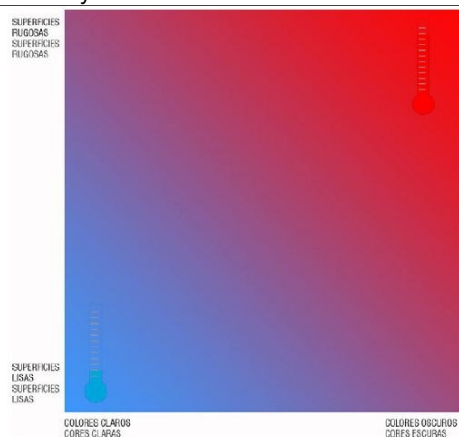


Fuente: Hernández, 2013, p.125

- Emisividad. Medida de capacidad de una superficie para emitir calor o emitir radiación de onda larga. (U.S.EPA, 2008, p.8) Es decir, mientras más alto el valor de un material, éste se mantiene frío debido a que emite calor rápidamente como los bosques (valor:0.98) y suelo mojado (valor: 0.98), de la tabla 3.

Por lo tanto, se deducen de forma general dos tipos de materiales: los calientes y los fríos, considerándose al último así en el caso su temperatura superficial sea similar a la temperatura del aire.

Figura 18: Materiales calientes y fríos



Fuente: Hernández, 2013, p.128

▪ Propiedades térmicas

- Capacidad térmica. Capacidad para almacenar calor de un material en particular, (U.S.EPA, 2008, p.8) es por ello que se dice que las áreas urbanas retienen o concentran mayor calor por el tipo de materiales de sus estructuras respecto a las áreas rurales o naturales, inclusive hasta el doble de calor de las primeras sobre las segundas.

Tabla 3: Características de algunos materiales según albedo y emisividad

SUPERFICIE	ALBEDO	EMISIVIDAD
MATERIALES DESARROLLADOS POR EL HOMBRE		
Asfalto	0.05-0.2	0.95
Hormigón	0.1-0.35	0.71-0.9
Ladrillo	0.2-0.4	0.9-0.92
Acero corrugado	0.1-0.16	0.13-0.28
Pintura blanca	0.7-0.9	0.85-0.95
Vidrio limpio	0.08	0.87-0.94
MATERIALES NATURALES		
Bosques	0.07-0.2	0.98
Hierba	0.15-0.3	0.96
Suelo mojado	0.1-0.25	0.98
Suelo seco	0.2-0.4	0.9-0.95

Fuente: Hernández, 2013, p.128; tomada de Oke, 1987 y Garraf, 1992

Hernández (2013), a través del Manual de Diseño Bioclimático Urbano¹⁶ señala que para países en latitudes intermedias, como es el caso de España, se produce mayor absorción de energía de las superficies verticales durante el invierno y para superficies horizontales, en el verano. Además, se debe tomar algunas consideraciones para cada superficie, dependiendo sea el caso:

- Color de los materiales. La importancia de los colores claros y oscuros y su relación con el valor de emisividad, genera las dos clases de materiales: fríos, de temperatura fresca y calientes, de temperatura cálida.
- Rugosidad de los acabados. Las superficies de características más rugosas considerarán una mayor absorción de energía, y, por ende, de temperatura más cálidas.
- Sombreamiento de las superficies. Característica importante de las edificaciones sobre las superficies y que éstas absorban menos energía durante las horas diurnas en el verano.
- Enfriamiento nocturno. Durante las horas nocturnas, la emisión de energía de las superficies se dirige a la atmósfera y ésta al estar más fresca genera enfriamiento sobre las superficies permitiendo disminuir temperaturas en las estaciones más calurosas, sobre todo en verano.
- Factor de vista de cielo (SVF). Es una característica geométrica de la morfología urbana y mientras mayor sea su valor, las superficies absorben mayor energía directa, pero por el contrario durante la noche emiten mayor radiación a la atmósfera, enfriando de manera más rápida. Cabe resaltar que lo último mencionado dependerá de la capacidad de emisión del tipo de material.

¹⁶ El Manual del Diseño Bioclimático Urbano, es el trabajo resultante del análisis y diseño bioclimático de los espacios libres, desarrollado durante 2012 al 2013 en el marco del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Portugal, con apoyo de la Unión Europea la cofinanciación comunitaria de Fondo Europeo de Desarrollo Regional-FEDER y el Programa de Cooperación Transfronteriza Portugal España-POCTEP. (Hernández, 2013, p.6)

2.3.5. Implicancias de las superficies en el confort térmico urbano

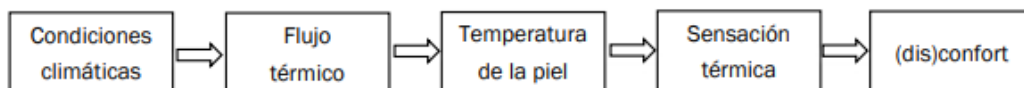
Si bien las temperaturas de superficies se ven afectadas por la morfología o estructura urbana de su contexto inmediato -altura, forma y orientación de edificaciones-, los flujos de calor se modifican (radiación reflejada de onda corta, radiación de onda larga, convección, evaporación y conducción). Éstas repercuten indirectamente, pero de forma significativa en la temperatura de aire debido que los materiales urbanos que van adquiriendo calor durante el día calientan el aire próximo -especialmente por la noche-. (Ayuntamiento de Barcelona, 2015)

Las alteraciones que pueden presentar el flujo térmico de superficies son: absorber mayor radiación solar y reducir la evaporación, generando directamente el aumento de temperaturas y disminución de la humedad en el día. Sin embargo, si se considera las sombras proyectadas sobre las superficies en espacios urbanos, se genera disminución de temperaturas y aumento de la humedad (similares a las temperaturas de aire) porque las expuestas pueden alcanzar entre 27°C a 60°C. (Ayuntamiento de Barcelona, 2015)

Por otro lado, la morfología urbana actúa como barrera para la circulación de aire por lo que modifican la velocidad y dirección de viento, disminuyendo la intensidad de ventilación y enfriamiento del clima urbano.

Es así como las temperaturas de superficie y aire -indirectamente- se ven modificadas, y cómo esas variaciones climáticas en la microescala afectan a las personas que usan el espacio urbano, generando la sensación térmica de confort.

Figura 19: Esquema del proceso de formación de la sensación térmica



Fuente: Cena *et al.* (1981)

CAPITULO III. ESTADO DEL ARTE

El estado del arte plantea subrayar, en general, aquellas investigaciones que han logrado aportar conocimientos y alcances al ámbito del clima urbano desde la mesoescala o escala regional hasta la microescala en Barcelona, asimismo detallar las metodologías desarrolladas por otras investigaciones a nivel internacional que contribuyan al análisis térmico a la escala urbana.

3.1. Estudios sobre el clima urbano en Barcelona

Desde las tres últimas décadas se han realizado investigaciones cuyos resultados han ido generando mayores conocimientos y alcances en el ámbito de la climatología urbana de la Región Metropolitana de Barcelona - RMB. Con el primer estudio empírico desarrollado en 1990, por Carreras, Marín, Martín-Vide, Moreno y Sabí, quienes establecen la primera aproximación al estudio de las alteraciones térmicas urbanas en Barcelona proponen aplicar técnicas usuales en el campo de la climatología urbana como: los transectos urbanos en automóvil¹⁷, para conocer la existencia de *UHI* en esta ciudad.

Primero, tras haber revisado la literatura sobre el *UHI* y la información existente hasta ese momento, deciden realizar observaciones en campo semanalmente durante dos años - desde octubre de 1985 hasta julio de 1987- en horario nocturno hacia las 22.30h promedio, (5 horas aprox., después de ponerse el sol es cuando presenta mayor intensidad el *UHI*, según literatura). Esto se realiza a través de la definición de 5 transectos distintos en automóvil, con el uso de dos estaciones termo-higrométricas digitales Hanna¹⁸, que alcanzan una longitud total de 108km mediante 121 puntos de observación distribuidos irregularmente sobre una malla de puntos densa donde algunos puntos se intersectan -esto revela y permite considerar la simultaneidad de las medidas-; con el objeto de registrar medidas térmicas e higrométricas.

Luego, éstos fueron analizados a nivel morfológico, ambiental y funcional; y finalmente contrastados con la información siguiente: meteorológica convencional (estaciones públicas), condiciones atmosféricas e imágenes satelitales -en ese mismo orden-. Esta metodología, comprueba la existencia del *UHI* con una intensidad de 6.9°C para la ciudad de Barcelona¹⁹, localizado en el sector derecho de'l Eixample -con sectores próximos a los barrios de Gracia, Sants y otros- y los que se representan mediante mapas de isotermas (de efecto meseta y araña) y en perfiles térmicos de fechas relevantes; sin embargo, no se consigue conocer con exactitud la ubicación.

Años más adelante, en 1993, Moreno afirma que el *UHI* de la ciudad de Barcelona se ubicaba en el barrio Dreia de'l Eixample (cerca al límite con el barrio de El Raval) y las zonas de efecto refrescante eran el Río Besos y algunos parques urbanos. Asimismo, demuestra en 1994, mediante su estudio que el mencionado *UHI* tiene una configuración similar a la concéntrica, y se atribuye principalmente a la homogeneidad física y urbana del distrito.

¹⁷ Transecto urbano en automóvil: Recorrido a través de una serie de puntos previamente seleccionados, para la toma sistemática de medidas meteorológicas (observación de los datos o medidas térmicas) sobre el terreno. (Martín-Vide J.,1990) Este instrumento fue utilizado por primera vez, por Schmidt y Pepler en 1927, en las ciudades de Viena y Karlsruhe que ha sido útil para estudiar las diferencias térmicas entre las ciudades y sus alrededores. (Moreno, 1999)

¹⁸ Estos instrumentos presentan baja inercia según señala sus especificaciones, es decir, que su uso es conveniente a pesar de flujos de aire durante las mediciones. En este caso se utilizó con un automóvil en marcha de 40km/h, en promedio. (Martín-Vide,1990)

¹⁹ Correspondiente a los 10 puntos registrados -valores de 7 a 14°C como mínimo y máximo- entre las 21.49h y 22.19h del 06-11-1986, y que se acerca a los 8°C como intensidad máxima del *UHI* según señala Oke en 1978. (Martín-Vide,1990)

Por otra parte, Moreno señala en 1999 respecto a la preparación y diseño de los transectos, que antes debe analizarse de manera minuciosa el plano de la ciudad -sus características urbanas- para luego definir el número de transectos y puntos, así como el trazado que deben seguir. Además, que los puntos deben situarse en lugares cuyo comportamiento climático sea relevante y peculiar, como los siguientes: confluencia de dos calles con tráfico denso, parque o zona ajardinada, centro comercial u otros.

Además, que debe considerarse la simultaneidad de las medidas de los puntos de medición, sobre todo si se trata de ciudades grandes y extensas cuyo tiempo total del recorrido puede significar variaciones en las temperaturas registradas, y no podrían considerarse simultáneas; por lo que, recomienda reducir el tiempo a 1 hora media, esto implica cortar el diseño de transectos y considerar varios con el objeto de tener medidas térmicas en un mismo punto o efectuar algunas correcciones.

También, menciona el método mediante teledetección de imágenes de satélite para el análisis de distribución espacial de la temperatura radiante de las superficies urbanas y su correlación con variables urbanas, el cual es usado para el estudio de UHI (Lombardo, 1985; Matson et al, 1978; Matson y Legeckis, 1980), pero que esta técnica se ha usado poco en España.²⁰

Figura 20: Perfil térmico medio respecto al perfil urbano aproximado de la ciudad de Barcelona



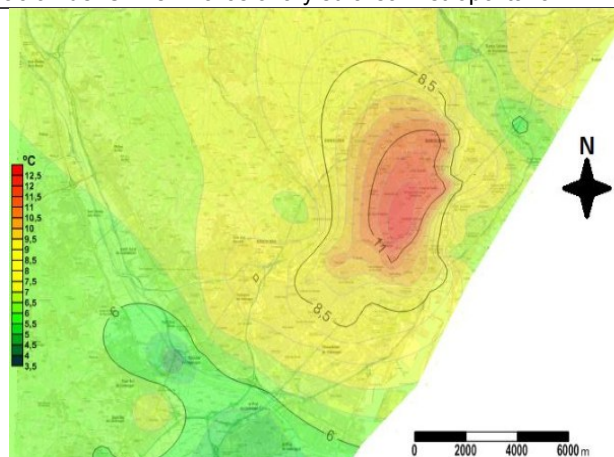
Fuente: Área Metropolitana de Barcelona, 2015, p.59

En el 2015, se determina que el *UHI* de Barcelona y su área metropolitana se ubica en la Plaza de la Universitat -punto de encuentro de los barrios Dreta de l'Eixample y El Raval- y es el Eixample, el distrito más predominante según la investigación realizada por Martín-Vide J., que consiste en observaciones durante veinte noches por transectos previamente establecidos y estudio de isotermas.

Además, que la intensidad del *UHI* se manifiesta durante la noche y en los meses de invierno. Asimismo, señala el efecto refrescante que generan los parques urbanos de la ciudad, alcanzando a reducir 2°C de la temperatura al interior, a través del estudio de dos parques situados en el casco urbano de la ciudad de Barcelona: el parque de la Ciutadella y el Turó Park. (Área Metropolitana de Barcelona [AMB], 2015).

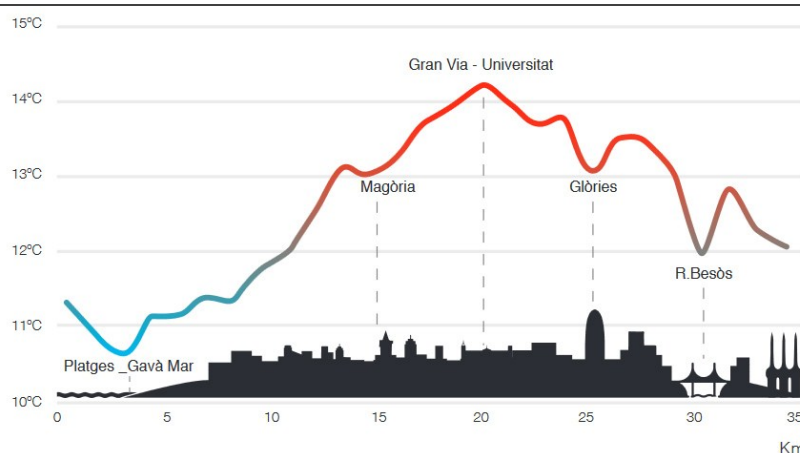
²⁰ Existen sólo dos estudios que utilizan este método en España, en Madrid -por López Gómez *et al*, 1993)- y Valencia -por Caselles *et al*, 1989-. (Moreno, 1999)

Figura 21: Configuración del UHI en Barcelona y su área metropolitana



Fuente: Área Metropolitana de Barcelona, 2015, p.59

Figura 22: Perfil térmico medio respecto al perfil urbano aproximado, que atraviesa la ciudad de Barcelona de SO a NE



Fuente: Área Metropolitana de Barcelona, 2015, p.59

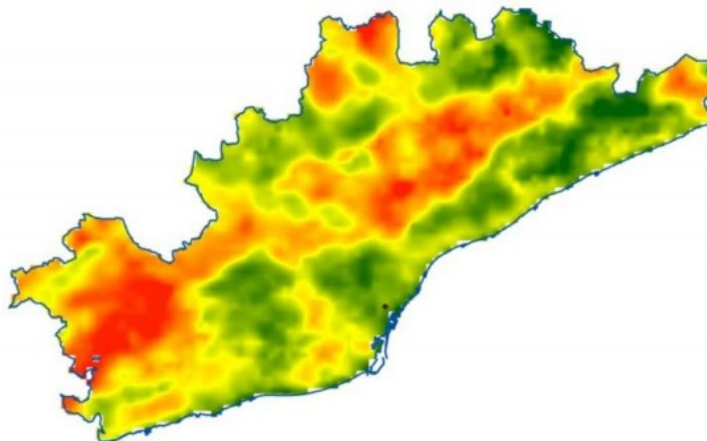
Por otro lado, ese mismo año, Arellano y Roca presentan un modelo del UHI de la Región Metropolitana de Barcelona a una escala de 30m²/pixel mediante el uso de imágenes satelitales correspondientes a inicios de octubre de 2011: "Lansat-8 (con sensores OLI y TIRS)" y "Modis (con su sensor Aster)" para registrar la temperatura de superficie - *LST* diurna y nocturna, respectivamente.

Para ello, se utiliza una nueva metodología de extrapolación (modelo explicativo OLS) para mejorar la resolución de 1 km²/pixel a 30m²/pixel de Modis, asimismo, contrastar los usos del suelo del Mapa Urbanístico de Cataluña - MUC con Landsat-8 y Corine Land Cover - CLC con Modis, así como otros indicadores: cantidad y calidad de vegetación, intensidad de la expansión urbana, distribución espacial de actividades económicas y tipos de morfología urbana; con el propósito que se esto sirva como herramienta adicional en el ámbito del diseño y planeamiento de la ciudad.

Con estos resultados, se demuestra la correlación moderada positiva ($R^2=0,727$) del *LST* día de Landsat-8 y *LST* día de Modis -a pesar que ambas tienen diferente resolución-. Asimismo, demuestra la correlación moderada negativo ($R^2=0,708$) de la vegetación (usos: suelo forestal y suelo rural) con el *LST* día. Sin bien durante el día, se registran *LST* más calientes en la periferia, sobre zonas de uso de actividades económicas como el "industrial" (31.21°C); durante la noche éste se observa en área "compacta" (17.63°C) y "de otros usos urbanos" (17.06°C). Por lo tanto, la diferencia de temperatura entre día y noche según

Modis, se observa que las cubiertas de suelo “forestal” tienden a enfriarse menos en la noche (figura 21, en gama verde), mientras que sucede todo lo contrario con el suelo “agrícola” e “industrial”. (figura 23, en gama roja)

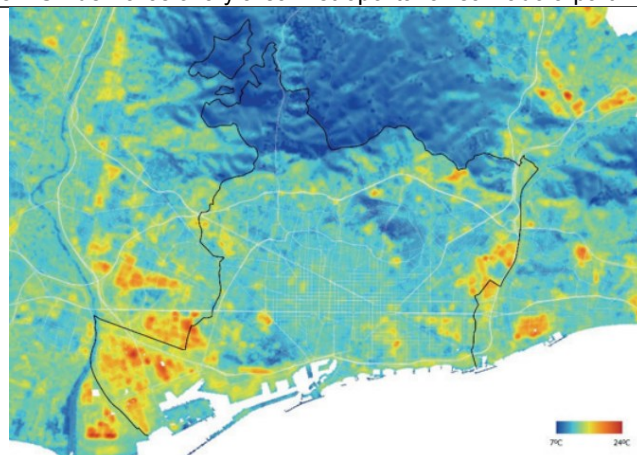
Figura 23: Diferencia del *LST* día y noche de la Región Metropolitana de Barcelona realizado a partir de Modis



Fuente: Arellano & Roca, 2015, p.808

En 2018, el Ayuntamiento de Barcelona, presenta a través del Mapa del *LST* (de Landsat-8) realizado por Barcelona Regional, en el día, las temperaturas más elevadas se ubican en zonas cuyas cubiertas se calientan más rápido como las que se encuentran en zonas industriales de la Zona Franca y las mínimas en zonas con vegetación. Asimismo, hace un acercamiento del análisis del albedo, vegetación y radiación solar; reconoce dos parques de la ciudad, muestra diferencia de barrios con distinta proporción vegetal como: con elevada proporción a barrios como Sant Martí de Provençals y Pedralbes, mientras, con poca vegetación a la Dreta de Eixample; y barrios de cubiertas más reflectantes como Zona Franca y Sants.

Figura 24: Mapa del *LST* de Barcelona y área metropolitana realizado a partir de Landsat-8



Fuente: Ayuntamiento de Barcelona, 2018, p.6

Con las investigaciones previas, se alcanza a estudiar del comportamiento del clima urbano a escala regional de la ciudad de Barcelona mediante diversas metodologías como transectos móviles, registros de datos climáticos de estaciones públicas, usos de suelo, análisis teledetección de imagen de satélite y modelos de correlación lineal. Asimismo, la escala urbana no ha sido muy desarrollada en Barcelona debido a la complejidad del desarrollo metodológico.

Por lo tanto, las siguientes investigaciones desarrollan metodologías enfocadas al clima urbano a escala local considerando diferentes características del diseño urbano diseño urbano.

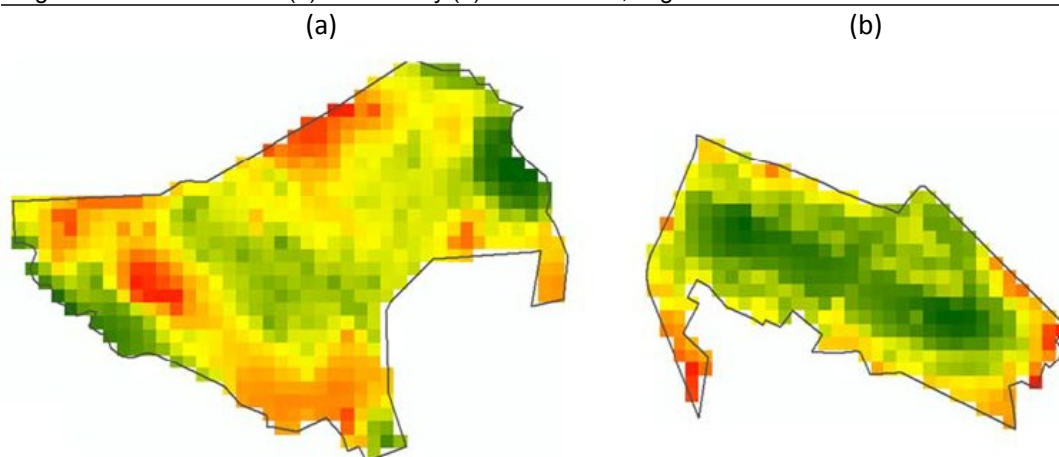
3.1.1. Estudios sobre el clima urbano a escala local

Una investigación relevante a esta escala para el ámbito de Barcelona, es el que desarrollan Roca, Arellano y Batlle en 2018, quienes plantean en su artículo cómo el diseño urbano afecta a la isla de calor urbana y si el diseño de áreas verdes puede mitigar la isla de calor urbana. Por lo que desarrollan dos casos de estudio, se trata de dos urbanizaciones con características urbanas similares, pero con diferente diseño de espacio público -parque ubicado en el centro o en la periferia-.

El primer caso de estudio es Parc Central, con diseño central del área verde, y el segundo es Coll Favà, con diseño de área verde en la periferia, ambos se ubican en el municipio de Sant Cugat del Vallés. La metodología consiste en: obtener información física y climática mediante el análisis de teledetección remota, y registrar datos térmicos mediante toma de mediciones “in situ”.

- Para la teledetección remota se utilizan imágenes de dos satélites: Landsat-8 (de resolución media de 30m² por pixel) para conocer el *LST* de día, y Modis (de resolución baja de 1km² por pixel) para conocer el *LST* de noche. Para mejorar la precisión de la imagen del ultimo satélite se realiza un modelo de regresión lineal de mínimos cuadrados ordinarios²¹. Las imágenes satelitales permiten conocer los índices de *NDVI*, para el efecto de la canopia de árboles y calidad de vegetación, o *NDBI*.
- Las mediciones “in situ” se realizan durante el día y noche del 3 y 4 de setiembre de 2016 para registrar el *LST* y *LSAT* de los casos de estudio. Estos datos permiten completar la información de los obtenidos por los satélites y confirmar la hipótesis planteada.

Figura 25: *LST* de día de (a) Coll Favà y (b) Parc Central, según Landsat-8



Fuente: Arellano, Roca & Batlle, 2018, p.12

Los primeros resultados arrojados por los indicadores urbanísticos (área construida, proporción del espacio público, espacio abiertos y áreas permeables) señalan mejor comportamiento climático de Coll Fava comparado a Parc Central, excepto que el último

²¹ Modelo de regresión lineal de Mínimos cuadrados ordinarios (OLS): Construye el comportamiento térmico de las superficies durante el periodo nocturno a partir de la correlación entre el conjunto de las características físicas de cada celda de las imágenes de Modis y el *LST* nocturna registrado. (Arellano & Roca, 2016)

caso supera al primero en el indicar de canopia de vegetación. A pesar de los indicadores previos, Parc Central debiera presentar mejor comportamiento climatico por prsentar un diseño más compacto y presentar area verde natural concentrado al centro.

Loa resultados tras el análisis teledetección de la imagen de Landsat-8, se confirma a Parc Central con mejor comportamiento climático alcanzando en promedio un *LST* de día de 32.65°C, respecto a Coll Favà de 35.54°C. Es cierto que la diferencia de 3°C es relevante a nivel urbano, ppero no si se trata a nivel geográfico. Por lo tanto, al analizar los histogramas del *LST* de día de los dos casos, se corrobora nuevamente a Parc Central.

Los resultados tras analizar el *LST* “in situ”, registrados mediante una cámara térmica, señalan que Parc Central presenta menores temperaturas de superficie tanto de día como de noche (34.08°C y 24.28°C, respectivamente) respecto al alcanzado por Coll Fava (44.30°C y 24.91°C, respectivamente).

Los resultados tras el analizar el *LSAT* “in situ”, registrados mediante un anenómetro, señalan tambien que Parc Central presenta menores temperaturas de aire tanto de día como de noche (33.12°C y 25.78°C, respectivamente) respecto al alcanzado por Coll Fava (38.14°C y 27.05°C, respectivamente).

Por lo tanto, con los resultados previos, se demuestra que el diseño del espacio público y areas verde de Parc Central genera mejor co portamiento térmico.

Tabla 4: *LST* y *LSAT* según mediciones “in situ” y Landsat-8

Caso de estudio	LST - Landsat 8	LST – registro in situ			LSAT – registro in situ		
	Día	Día	Noche	Diferencia	Día	Noche	Diferencia
Parc Central	32.73	34.08	25.78	8.30	34.08	25.78	8.30
Coll Favà	35.44	44.30	27.08	17.25	44.30	27.08	17.25
Diferencia	2.71	10.22	1.27		10.22	1.27	

Fuente: Roca *et al.*, 2018, p.14

3.1.2. Estudios sobre el clima urbano a la microescala

Por su parte, García -en 2017- mediante su investigación sobre las islas de frío en Barcelona realiza a estudio a la escala del microclima y plantea que la composición física de los espacios públicos incide significativamente en la influencia que éstos tienen en el clima de su entorno, y que los parques que cuentan con mayor cantidad de vegetación y superficie permeables tienden a generar mayor efecto de enfriamiento en su entorno; con el objetivo de identificar la relación de la conformación física de los parques con su influencia climática, mediante 3 análisis:

- Cuantificar el efecto de enfriamiento de 86 parque urbanos del municipio de Barcelona mediante *LST* de Landsat-8 y evaluar sus correlaciones con 3 indicadores: geográfico, forma y tamaño.
- Estimar la influencia climática de dos parques urbanos con variación del *LSAT* y *LST* según mediciones en campo y evaluar su evaluar sus correlaciones con 3 indicadores señalados.
- Cuantificar el efecto climático de los dos parques urbanos mediante variaciones de temperatura y velocidad de viento, mediante un gráfico que simule el comportamiento climático de los parques y alrededores en retículas de 5m, a través de la herramienta Envimet.

Los dos casos de estudio se seleccionan por las siguientes características: diseño diferente en su interior y en la configuración urbana de su entorno. El primer caso corresponde al Turó Park en el distrito de Sarrià Sant-Gervasi de y el segundo, al Parc del Centre del Poblenou en el distrito de Sant Martí.

El desarrollo metodológico de esta investigación consiste en diversas fuentes de información y procesos: teledetección remota para el análisis de imagen de satélite, mediciones en campo para el registro de información física como climática, la Correlación lineal de Pearson para conocer las relaciones entre variables físicas y climáticas y el programa Envimet para construir modelos de simulación térmicas.

También recoge información climática de las estaciones meteorológicas públicas, pero como referencia del clima urbano.

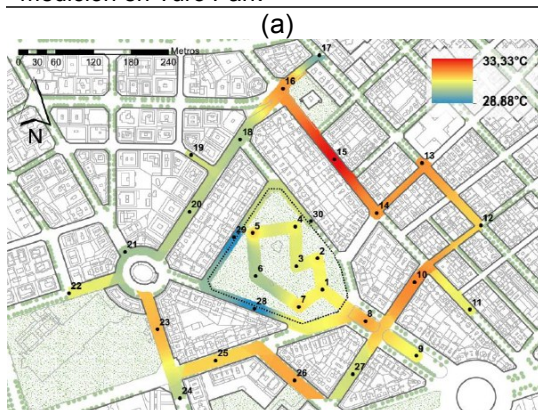
- Para la teledetección remota utiliza una imagen del satélite Landsat-8 (de resolución media de 30m² por pixel) del día 21 de junio de 2017, para conocer el *LST* de día, *NDVI*, *NDBI*, albedo y radiación solar de los espacios.
- Las mediciones en campo consisten en campañas de medición, los días 16 al 19 de julio de 2017, mediante 2 transectos con 67 puntos -en total- definidos para registrar *LST* y *LSAT* de día y noche. Para el *LSAT* se utiliza el instrumento Skywatch Windoo 3 y para el *LST*, la cámara termográfica Flir E60.
- La correlación lineal se utiliza como método estadístico descriptivo para estimar tendencias y coeficientes determinantes (R^2) entre los valores de los indicadores geográficos (altitud, distancia al mar y distancia al parque forestal), formales (superficie, índice de forma del territorio, índice de circularidad, índice de compacidad) y microclimático (*LST* media del parque y *NDVI*).
- Mediante el programa Envimet se realiza las simulaciones térmicas de los dos parques para analizar la influencia de los vientos en el efecto climático en ellos y se construyó un escenario propuesto.

Figura 26: Mapa del *LST* de día en puntos de medición en: (a) Turó Park y (b) Parc del Centre del Poblenou



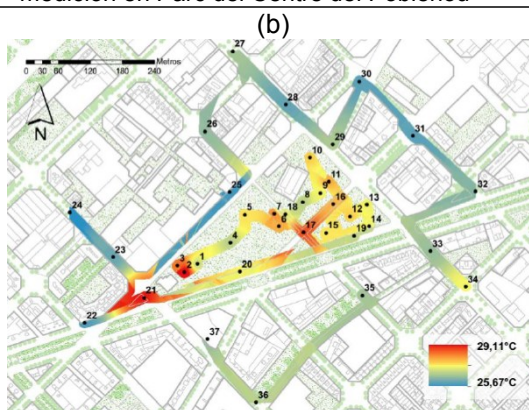
Fuente: García, 2017, p.122

Figura 27: Mapa del *LSAT* de día en puntos de medición en Turó Park



Fuente: García A., 2017, p.122

Figura 28: Mapa del *LSAT* de día en puntos de medición en Parc del Centre del Poblenou



Fuente: García A., 2017, p.73

Por lo tanto, los resultados demuestran que los índices de vegetación de los parques influyen de forma positiva en el efecto de enfriamiento, por su parte la altitud media de los parques favorece al alcance de enfriamiento, y mientras más compacta y compleja sea la forma de parque es mayor la intensidad de enfriamiento.

Sin embargo, si se compara los dos casos de estudio, se observa que el Turó Park tiene más alcance e intensidad de enfriamiento, compactidad, distancia la mar y altitud que el Parc del Centre del Poblenou, pero menor *LST* y complejidad de forma. Por su parte, las superficies permeables inciden de forma positiva en el *LSAT*, pero negativa en el *LST*, registrados en campo.

Finalmente, se precisa que el Turo Park presenta mayor efecto de enfriamiento que el Parc Centre del Poblenou, y que la isla de calor se relaciona positivamente con la vegetación, el porcentaje de superficies permeables, la complejidad de la forma del parque y su compactidad; y también se percibe más en las temperaturas de superficies.

3.2. Revisión de nuevas propuestas metodológicas para el clima urbano a nivel nacional e internacional

Con las siguientes investigaciones se pretende abordar nuevas metodologías -análisis como procesos- desarrolladas en el ámbito de Barcelona y a nivel internacional, para el estudio del clima urbano, que hayan presentado apoyado a esta investigación.

3.2.1. Estudios de simulación de *LST* en superficies horizontales en Barcelona

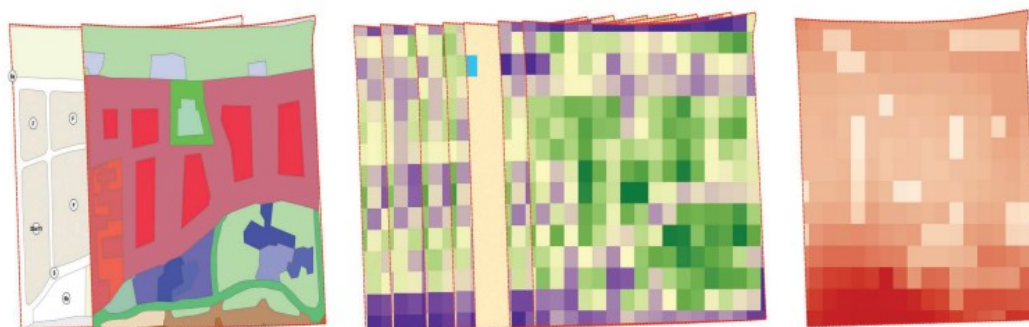
La investigación realizada por Figols en 2018²², plantea definir una metodología que permita obtener una simulación de *LST* para propuestas urbanísticas de forma que se pueda evaluar su impacto en la generación de la isla de calor urbana si se desarrollaran y que permita comparar diferentes propuestas urbanísticas planteadas un mismo ámbito para determinar cuál sería la mejor desde el punto de vista de su comportamiento térmico.

²² Tesis titulada: Avaluació de propostes urbanístiques mitjançant l'obtenció de la seva *Lst* simulada. Proposta de metodologia i cas d'estudi al front marítim de Gavà. Traducido del catalán al español: Evaluación de propuestas urbanísticas mediante la obtención de su *LST* simulada. Propuesta de metodología y caso de estudio en el frente marítimo de Gavà.

El desarrollo de la investigación se ubica en el frente Marítimo de Gavà (Barcelona), específicamente en el sector de Llevant Mar -en uno de los pocos sectores de suelo urbanizable pendientes a desarrollar-, pero para simular comportamientos térmicos de planeamientos propuestos se analizan previamente dos ámbitos que se seleccionan por su proximidad, características climatológicas y morfológicas (variedad de cubiertas, ordenación y magnitud) similares a Llevant del Mar: Les Marinas y Cadaqués.

Y con éstos se pretende: obtener mapas simulados de *LST*, comprobar la idoneidad de la metodología que propone, así como la eficacia de las herramientas SIG para desarrollarla, y evaluar a través de los resultados si se puede aplicar a otros lugares del territorio.

Figura 29: Proceso metodológico para alcanzar mapas con *LST* simuladas – Caso Les Marines

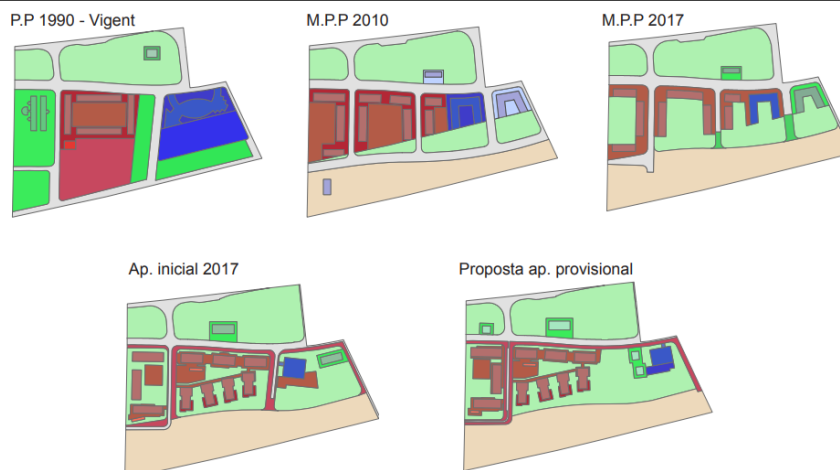


Fuente: Figols, 2018

El desarrollo metodológico de esta investigación consiste en dos partes: primero “analizar el ámbito de estudio” que implica digitalizar los polígonos del ámbito de estudio (Planificación del AMB), las cubiertas de suelo del CREAM (versión 2009), obtener índices de vegetación, edificación, *LST* diurna y nocturna, así como calcular los valores medios del *LST* por cada cubierta de suelo.

Y segundo, “analizar las propuestas con *LST* simuladas” que aborda la digitalizar las propuestas con asignación de valores de cubiertas de suelo y parámetros urbanísticos, trasladar las temperaturas obtenidas a cada cubierta de suelo y generar un grid de 30m x 30m para generar los mapas con *LST* simuladas. Y para esto, se utiliza el análisis mediante teledetección y la herramienta SIG.

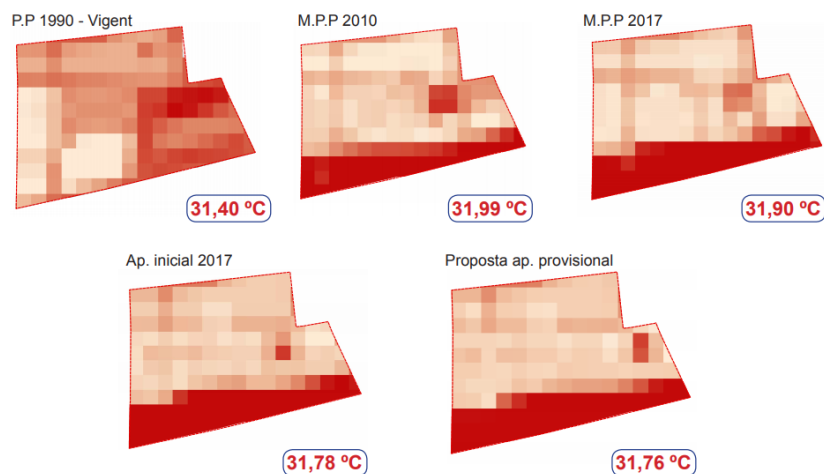
Figura 30: Hipótesis de cubiertas de suelo – Caso Llevant Mar



Fuente: Figols, 2018, p.100

- Para la teledetección remota utiliza una imagen del satélite Landsat-8 (de resolución media de 30m² por pixel) del día 15 de agosto de 2018 y una imagen de Modis (de resolución media de 1km² por pixel), para conocer el *LST* de día, *NDVI*, *NDBI*, *MNDWI*, *IBI*, *SAVI*, y *LST* de noche, respectivamente, de los tres casos de estudio.
- Para el proceso de digitalización de cubiertas de suelo, análisis de temperaturas y mapas de *LST* de día y noche, se usa las herramientas CAD y SIG.

Figura 31: Obtención de *LST* simuladas – Caso Llevant Mar



Fuente: Figols, 2018, p.62

Como resultado, se comprueba que la metodología establecida es válida para obtener *LST* simuladas y que se pueden comparar otras propuestas urbanísticas, además, tras el análisis comparativo de propuestas resulta con mejor comportamiento térmico. A pesar que no se obtiene el *LST* nocturna con la resolución necesaria, metodología es útil para obtener el *LST* simulada. Finalmente, el uso de la herramienta SIG ha sido fundamental para alcanzar los resultados esperados.

3.2.2. Estudios de análisis metodológicos del clima urbano y medio físico a nivel internacional

Barrera en 2018, mediante su investigación de evaluación de la sostenibilidad urbana a partir del análisis de las características climáticas y del medio físico construido, pretende determinar si el crecimiento y estructura urbanos corresponden al clima local de la misma ciudad. Por lo que, desarrolla una metodología que pueda ser aplicable a cualquier ciudad con clima frío, templado, cálido-seco y cálido-húmedo; y para aplicar la metodología propuesta, toma como caso de estudio a la ciudad de Hermosillo, México.

El desarrollo para la propuesta del modelo metodológico de evaluación, se divide en 6 fases: establecimiento de antecedentes, análisis climático, requerimientos del entorno, análisis del Medio Físico Construido (MFC), evaluación y recomendaciones; y considera el uso de 21 indicadores -3 de localización, 6 climáticos y 12 del MFC-. (tabla 5)

Respecto al Medio físico construido, la variable de análisis de edificaciones incluye entre sus indicadores a la “densidad” y sombreamiento”; el primero por ser clave en el ordenamiento ambiental de una ciudad y ésta sea sostenible. Además, señala sobre la densidad que está relacionada a la morfología vertical como horizontal de la ciudad, su estructura vial y ocupación de superficie; y que genera un efecto directo sobre el *LST*. (Erell, 2008)

Por lo tanto, además de la densidad edificatoria urbana, se mencionan:

- Intensidad edificatoria. Total, de suelo utilizado por cada predio catastral urbano, tomando en cuenta su altura y el número de niveles edificados que albergan cada uno de ellos.
- Verticalidad. variedad de alturas promedio que tienen las diversas edificaciones en la ciudad y su distribución dentro de la ciudad. Esta está relacionada con la intensidad edificatoria.

Tabla 5: Variables e indicadores de la propuesta metodológica

Variable	Indicador	Unidad	Fuente de información	
PARAMETROS AMBIENTALES				
De localización	Latitud	° ' ''	Normales climatológicas/Bibliografía	
	Longitud	° ' ''		
	Altitud	msnm		
Climáticas	Radiación solar	Wh/m2	Normales climatológicas/ Meteoronom	
	LSAT	°C		
	Humedad relativa	%		
	Velocidad y dirección de viento	m/s		
	Nubosidad	días		
	Precipitación pluvial	mm		
PARAMETROS FISICOS				
Edificaciones	Densidad edificatoria urbana	Viv./hab.	Catastro	
	Sombreamiento	%	Landsat-8	
Vialidades	Superficie vial	km2/tipo	Planificación	
	Material	Superficie por tipo de material		km2
		LST	°C	Landsat-8
		Albedo y emisividad	%	Bibliografía
	Vegetación	Superficie vegetal	km2	Landsat-8
		Sombreamiento	%	Landsat-8 /Imagen DTM
	Espacios abiertos (plazas, jardines y espacios deportivos)	Superficie total	km2	Catastro
Cuerpos de agua		km2	Catastro/Landsat-8	
LST		°C	Landsat-8	
Sombreamiento		%		

Fuente: Barrera, 2018, p.87

El resultado de la validación de la metodología propuesta es positivo, y puede ser aplicable a cualquier y tipo de clima (es decir, según 4 regiones climáticas, establecidas por V. Olgyay), siempre y cuando se tenga la información necesaria de entrada; en esta investigación se emplea información de datos abiertos para que pueda ser fácil su uso y análisis en el clima local. Además, que a la escala analizada de los indicadores propuesto es posible establecer un status de la ciudad.

Por otro lado, señala, que esta metodología, permite realizar análisis a escalas más reducidas con el objeto de para generar recomendaciones y proyectos más específicos y puntuales. (sectores de planificación, planes parciales, y otros)

En Brasil, Plentz (2006)²³ desarrolla una investigación que aborda una propuesta metodológica para el análisis y procesamiento de las coberturas de suelo entre otros variables y mediante cual propone evaluar el confort térmico de espacios públicos abiertos en áreas urbanas con diferentes configuraciones morfológicas, mediante una propuesta metodológica de evaluación que compare índices de confort térmico (calculados a partir de variables ambientales y los recogidos en campo).

El desarrollo de la investigación se ubica en Torres, una ciudad litoral con fuerte vocación turística en el estado de Río Grande del Sur - Brasil; su elección se debe al creciente proceso de verticalización y densificación que presenta en el centro. Los casos de estudio son tres plazas localizadas contextos urbanos con configuraciones morfológicas diferentes y los criterios considerados son las variables de la forma urbana (altura de edificación y densidad, permeabilidad de las coberturas de superficie y presencia de vegetación).

La metodología de esta investigación consiste dos procesos:

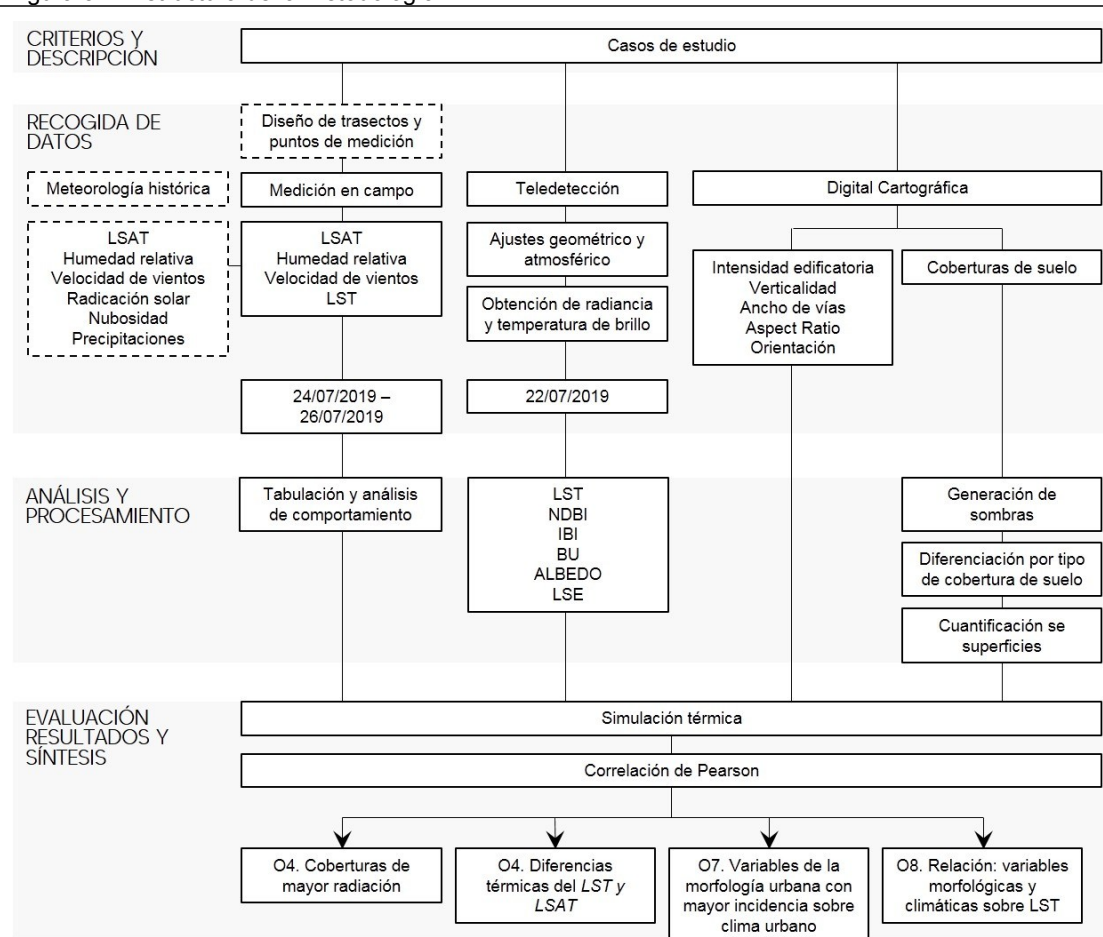
- Primero, describir las técnicas de recolección de datos. implica realizar un estudio piloto previo en campo de los casos de estudio llevado a cabo el 22 de abril de 2005 (aplicar cuestionarios, levantamiento de condiciones ambientales a través de medición de temperatura de aire y humedad relativa), registrar información de otras entidades (cartográfico, urbanístico, fotográfico y climático histórico), y el levantamiento en campo (detalle de la morfología, vegetación y pavimentación, mediciones de las variables ambientales y desarrollo de cuestionarios).
- Segundo, analizar los datos cualitativos (en forma de plantillas de Excel y de mapas de AutoCAD), cuantitativos (resultados de los cuestionarios son tabulados en el programa SPSS/PC para después obtener relaciones estadísticamente significativas de las variables) y cálculos del índice del confort térmico.

²³ Tesis titulada: Conforto térmico em espacios públicos abiertos na cidade de Toores –RS. Traducido del portugués al español: Confort térmico en espacios públicos abiertos en la ciudad de Toores –RS

CAPITULO VI. METODOLOGIA

El desarrollo metodológico se aborda mediante cinco apartados de modo correlativo, es decir, el orden establecido de cada apartado permite una comprensión más fácil del proceso. Como primer apartado, se selecciona los dos casos de estudio en el ámbito del Área Metropolitana de Barcelona - AMB considerado criterios morfológicos para enmarcar la escala de estudio y su respectiva caracterización urbana relevante, luego, y como segundo apartado, se describen los métodos y técnicas para la recolección de datos necesarios que conforman la información de entrada para el posterior análisis y pre-procesamiento, correspondiente al tercer apartado. En los apartados cuarto y quinto, se selecciona y procesa la información necesaria para alcanzar los objetivos propuestos, referido a la relación entre la morfología urbana y el comportamiento térmico las superficies horizontales del espacio público mediante el análisis del “uso de relaciones” y “construcción de simulación térmica”, respectivamente.

Figura 31: Estructura de la metodología



Fuente: Elaboración propia

4.1. Selección de casos de estudio

Este primer apartado de la metodología se desarrolla en dos sub apartados: primero, para definir los dos casos de estudio mediante criterios de la morfología urbana; segundo, para situar los casos de estudio en planos de ubicación a escala de municipio y barrio (1:10000 y 1:950, respetivamente) y describir su contexto urbano complementado con información estadística municipal del Ayuntamiento de Barcelona e imágenes fotográficas propias.

4.1.1. Criterios de selección

En este primer sub apartado de la metodología se establece dos casos de estudio en el AMB, que se enmarcan en *LCZ* propuestos por Stewart y Oke (2012). El Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña - ICGC y Universidad de Barcelona - UB (s.f.) aplican esta clasificación para el AMB, sobre el cual, casos de estudio de la presente investigación se sitúan en el *LCZ 2: Compact mid-rise* o Compacto de mediana altura, quienes usaron diversas fuentes como: Urban Atlas (GSD=0,25ha), CORINE Land Cover (GSD = 25 hectáreas), MCSC IV (GSD = 0,25m), 3D Modelo de la AMB (GSD = 0,5m), Ortofotografía de Cataluña, Imágenes Landsat-8 (GSD = 30m), Google Earth Pro (Modelo 3D e Imágenes en satélite). Por lo tanto, los dos casos de estudio se eligen porque, a pesar de pertenecer a la misma *LCZ*, presentan diferentes características morfológicas.

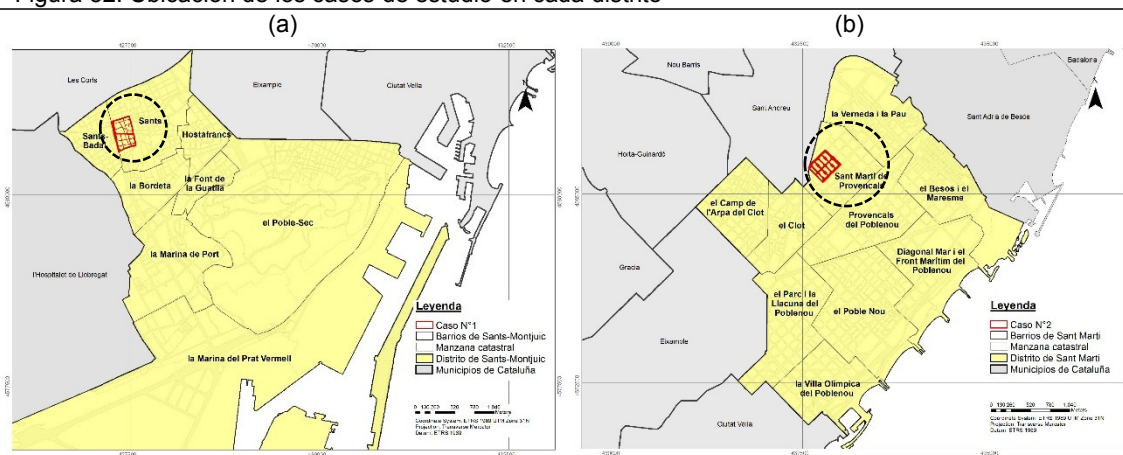
Las variables de morfología urbana que se consideran para el *LCZ 2* son: Ratio de aspecto de valor '0.75-1.5', Factor de vista de cielo de valor '0.3-0.6', Fracción de superficie edificada de 40%-70%, Fracción de superficie impermeable de 30%-50%, Altura de edificios de 8-20 plantas²⁴.

Para entender la relevancia de estos criterios expuestos como puntos de partida de la investigación, es importante recordar que la hipótesis establecida plantea la relación de la morfología urbana y temperaturas de coberturas en superficies horizontales.

Por lo tanto, esta investigación no toma en cuenta criterios geográficos como la *altura sobre nivel del mar* y la *proximidad al mar*, ya que los dos casos de estudio presentan datos similares de estos dos últimos criterios.

4.1.2. Descripción

Figura 32: Ubicación de los casos de estudio en cada distrito



Fuente: Elaboración propia

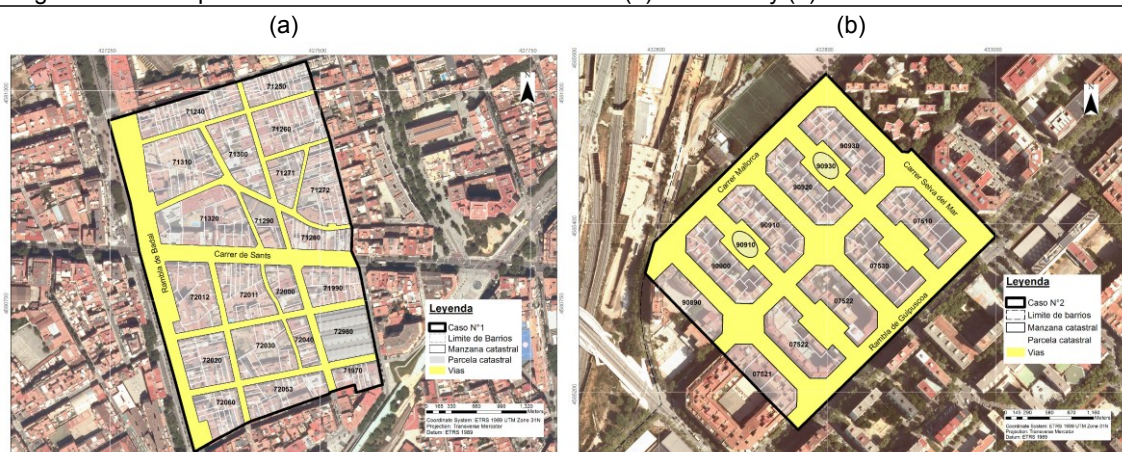
* Ambos a escala 1:10 000

²⁴ El detalle de estas variables se encuentra en la figura 11, pág.27

El caso N°1 (figura 32, a), se ubica en el barrio de Sants (latitud 41°22'N, longitud 2°8'E), al norte del distrito municipal Sants-Montjuïc del AMB, que estuvo vinculado al desarrollo industrial de textiles -proceso de blanqueo y acabados- de Barcelona durante los siglos XIX y XX (Dot, 2019). Sants cuenta con una población de 41,127 habitantes sobre una superficie de 109.8ha, una densidad de 375hab./ha y una densidad neta de 740hab./ha. Asimismo, los usos predominantes, según orden de importancia son: residencia con 50.6% y equipamiento 6.2%. (Ayuntamiento de Barcelona, 2018, a)

Mientras que el caso N°2 (figura 32, b) se ubica en el barrio de Sant Martí de Provençals (latitud 41° 25'N, longitud 2° 11'E), al noroeste del distrito municipal Sant Martí del AMB. Sant Martí de Provençals cuenta con una población de 26,146 habitantes sobre una superficie de 74.5ha, una densidad de 351hab./ha y una densidad neta de 1.116hab./ha. Asimismo, los usos predominantes, según orden de importancia son: residencia con 31.4% y equipamiento 12.0%. (Ayuntamiento de Barcelona, 2018, a)

Figura 33: Descripción catastral de los casos de estudio: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2



Fuente: Elaboración propia

* Ambos a escala 1:900

Respecto a las características de la morfología y estructura urbana, el primero, emplazado entre las vías: Carrer²⁵ de Sants -eje transversal- y Rambla de Badal -eje longitudinal- (figura 33, a), comprende una superficie total de 96,532.47m² (9.65ha) distribuido en 71.61% de parcelas y 28.40% de vial; se ubica entre 22m a 33m altitud sobre el nivel del mar, a 3535.00m de distancia respecto al mar y con una orientación de 107° NO-SE -considerando como eje la Rambla de Badal-. Este caso de estudio se distribuye en 21 manzanas, 306 parcelas y 326 edificios; la altura de los últimos varía entre 1 a 10 plantas predominando los de 2, 3 y 5 plantas -con 78, 58 y 51 edificios, respectivamente-.

Por otro parte, el segundo, emplazado entre las vías Carrer Mallorca, Carrer Selva del Mar y Rambla de Guipúzcoa (figura 33, b), comprende una superficie total de 90,394.88m² (9.04ha) distribuido en 46.79% de área parcelas y 53.21% de vial; se ubica entre 7m a 16m de altitud sobre el nivel del mar, 2198.00m de distancia respecto al mar y con una orientación de 134° NO-SE -considerando como eje Carrer Selva del Mar-. Este caso de estudio se distribuye en 10 manzanas, 111 parcelas y 127 edificios; la altura de los últimos varía entre a 4 a 12 plantas predominando los de 8, 7 y 9 plantas -con 61, 41 y 10 edificios, respectivamente-.

²⁵ Carrer (término en catalán) o calle (término en español)

Tabla 6: Caracterización de los casos de estudio

	CASO N°1		CASO N°2	
Distrito	Sants-Montjuic		Sant Martí	
Barrio	Sants		Sant Martí de Provençals	
Ubicación geográfica*	427429.0300 E / 4580809.8700 N		432797.0500 E / 4585372.3200 N	
Altitud* ¹	27.50 m* ²		11.50 m* ³	
Distancia al mar* ⁴	3,535.00 m		2,198.00 m	
Área total	9.65ha (96,529.65m²)	100.00%	9.05ha (90,518.18m²)	100.00%
Parcelas	6.92ha (69,182.10m ²)	71.67%	4,24ha (42,389.97m ²)	46.83%
Vial	2.73ha (27,347.55m ²)	28.33%	4.81ha (48,128.21m ²)	53.17%
Nro. de manzanas	21		10	
Nro. de parcelas	306		111	
Orientación* ⁵	107° NO-SE		134° NO-SE	
No. de edificios	326	100.00%	127	100.00%
Edificios 1 planta	22	6.75%	-	-
Edificios 2 plantas	78	23.93%	-	-
Edificios 3 plantas	58	17.79%	-	-
Edificios 4 plantas	41	12.50%	1	0.80%
Edificios 5 plantas	51	15.64%	2	1.57%
Edificios 6 plantas	41	12.58%	-	-
Edificios 7 plantas	13	3.99%	41	32.28%
Edificios 8 plantas	7	2.15%	61	48.03%
Edificios 9 plantas	5	1.53%	10	7.87%
Edificios 10 plantas	10	3.06%	4	3.15%
Edificios 12 plantas	-	-	8	6.30%
Ancho vial* ⁶	4.18ml - 19.90ml		20.00ml - 36.90ml	
Materiales de coberturas	<ul style="list-style-type: none"> Asfalto color negro Panot: 4 tabletas y La Flor Hormigón (Adoquín color gris y terracota, y loseta lisa) Piedra de granito Suelo desnudo, poca vegetación 		<ul style="list-style-type: none"> Asfalto color negro y rojo Panot: 4 tabletas, y La Flor Loseta Arena Suelo desnudo, poca vegetación Arena 	

Fuente: Elaboración propia

* La ubicación geográfica refiere al punto medio del perímetro de cada caso de estudio.

*¹ La altitud se calcula respecto al nivel del mar - msnm

*² Este valor corresponde a las medias de 22m a 33 m

*³ Este valor corresponde a las medias de 7m a 16m

*⁴ La distancia al mar respecto a cada caso de estudio, se calcula desde el punto más próximo del perímetro

*⁵ Para la orientación se considera la cantidad predominante de manzanas catastrales.

*⁶ El ancho vial es el rango de las medidas mínima y máxima.

Respecto a las características del espacio público, el primero presenta vías cuyos anchos varían entre 4.18m a 19.90m, considerándose en este caso la mitad del ancho de la Rambla de Badal debido que el eje de éste es también límite de barrios.

Para los pavimentos se emplea diversos materiales, las calzadas más transitadas -en este caso Rambla de Badal y Carrer de Sants- considera el asfalto color negro mientras que el espacio de tránsito a nivel vecinal o zonal -de un solo sentido- considera adoquines color gris y para los cruces, adoquines color terracota. Cabe mencionar que éstos espacios de tránsito fueron remodelados para el mayor disfrute del peatón y menos del vehículo, cuyas características originales priorizaban sólo al último.

Para aceras, generalmente, se emplea dos tipos de panots: '4 tabletas' y 'La Flor', y losetas de 40x60cm para las dos vías más transitadas; asimismo, piedra de granito para los bordes viales ubicados a lo largo de la Rambla de Badal, y superficies de suelo desnudo o poca vegetación como los ubicados en un huerto y en parte de la Rambla de Badal. (figura 34)

Figura 34: Fotografías del entorno del caso de estudio N°1



Fuente: Elaboración propia, en base a fotografías registradas el 10/07/2019 - 11:00 horas

Figura 35: Fotografías del entorno del caso de estudio N°2



Fuente: Elaboración propia, en base a fotografías registradas el 08/07/2019 - 11:00 horas

En cambio, el segundo plantea vías con anchos que varían entre 20.00m a 36.90m con materiales similares a los utilizados en los pavimentos del primer caso, como: para las calzadas se emplea asfalto color negro, para las aceras dos tipos de pavots: '4 tabletas' y 'La Flor', loseta lisa en la Rambla de Guipúzcoa, asimismo, suelo desnudo o poca vegetación -se ha considerado los de mayor tamaño por ser más relevantes- y presenta cuatro plazas recubiertas con asfalto color rojo y en dos de los últimos, un espacio de recreación infantil con arena. (figura 35)

Respecto al arbolado, en ambos casos se encuentran a lo largo de las aceras y en plazas, no obstante, difieren en cantidad y altura siendo de 5m aprox. para el primer caso, y de 10 m a 20m aprox., para el segundo caso.

4.2. Métodos para recolección de datos e información

Este segundo apartado de la metodología desarrolla las técnicas utilizadas para la recolección de datos e información, de diferentes fuentes, necesarios para el posterior análisis y procesamiento. La información de entrada se ha dividido en cuatro sub apartados de la manera siguiente: información cartográfica digital de diversas escalas -desde el ámbito de la comunidad autónoma de Cataluña hasta el ámbito metropolitano de Barcelona-, información climática histórica de los últimos 5 años de estaciones meteorológicas automáticas ubicadas próximas a los ámbitos de estudio, información de imágenes satelitales que permitan generar *LST* diurna y nocturna como otros índices de cobertura del suelo común, e información morfológica como climática recogida del trabajo de campo.

4.2.1. Cartografía

Información digital de la cartografía del portal web de diferentes como: Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña de la Generalitat de Cataluña - ICGC (<https://www.icgc.cat/>), Ayuntamiento de Barcelona (Carto BCN - <https://w20.bcn.cat/cartobcn/>), Área Metropolitana de Barcelona (Datos abiertos - <https://geoportalcartografia.amb.cat/AppGeoportalCartografia2/index.html>) e Instituto Geográfico Nacional (https://pnoa.ign.es/productos_lidar). Esta información permite delimitar los polígonos de los dos casos de estudio, identificar manzanas o islas y parcelas, registrar la nomenclatura vial respectiva, conocer la topografía mediante modelos digitales, reconocer los usos de suelo establecidos, elevación de edificaciones y la ubicación de vegetación, cuantificar las áreas y tipos de coberturas de superficies horizontales características y predominantes, asimismo, se considera el uso de otras imágenes que servirán como base de estudio: ortofotos y ráster.

- Topografía municipal de Barcelona (última actualización 04/12/2019). Modelo digital tridimensional de escala 1: 1000 en formato CAD y GIS, en coordenadas ETRS89.
- Islas y Parcelas de Barcelona (última actualización 04/12/2019). Modelo digital en formato CAD y GIS.
- Planeamiento urbanístico de Barcelona (última actualización 04/12/2019). Modelo digital en formato CAD y GIS.
- Sectores y ámbitos de Barcelona (última actualización 04/12/2019). Modelo digital en formato CAD y GIS.
- Rotulación de viales y espacios de Barcelona (última actualización 04/12/2019). Modelo digital en formato CAD y GIS.
- Nomenclatura de los espacios públicos de la ciudad de Barcelona (última actualización 05/03/2019). Información en formato CSV.

- Modelos digitales. En este modelo se distribuyen dos variantes: Modelo Digital del Terreno- MDT²⁶ y Modelo Digital de Superficie - MDS²⁷.
Modelo digital de elevaciones del AMB. Modelo digital de la superficie del terreno mediante una malla regular de 0.5m de tamaño de píxel. El valor de elevación se representa en escala de color con valores entre -10m y 649m Formato TIFF.
Modelo digital de sombras del AMB. Modelo digital de la iluminación de la superficie del terreno suponiendo que el Sol se encuentra en un azimut de 315° y una elevación de 45° respecto del horizonte, mediante una malla regular de 0,5m de tamaño de píxel. El valor de iluminación se representa en escala de grises, de 0 negro a 255 blanco. Datos del 2016 y en formato TIFF.
Modelo digital de orientaciones del AMB. Modelo digital de la orientación de la superficie del terreno, mediante una malla regular de 0,5m de tamaño de píxel. El valor de orientación se representa entre 0° y 360° medido en sentido horario desde el norte. Datos del 2016 y en formato TIFF.
Modelo digital de pendientes del AMB. Modelo digital de la pendiente de superficie del terreno, mediante una malla regular de 0,5m de tamaño de píxel. El valor de pendiente se representa con porcentaje (%) entre 0 a 434. Datos del 2016 y en formato TIFF.
- Mapa de usos de suelo del AMB. (Última versión 2011) Modelo digital temática a escala 1: 50 000. Formato PDF y GIS.
- Ortofoto. Mosaico continuo de fotografías aéreas, de elevada calidad y precisión mediante una malla regular de 25cm de tamaño de píxel que cubre toda Cataluña.
- LIDAR 2ª Cobertura (Última versión 2015). Mapa a nivel nacional con información altimétrica de: relieve del territorio y elementos que se encuentran sobre el último, distribuidos en ficheros de extensión de 2x2 km -para Cataluña- y densidad mínima de 0,5 puntos/m². Formato LAZ 1.2 versión 3.

4.2.2. Climática histórica

Información meteorológica histórica del periodo 2014 al 2018 del portal web del Servicio de Meteorología de Cataluña de la Generalitat de Cataluña (<http://www.meteo.cat/>). Se elige las tres estaciones por su proximidad, y características propias, a los 2 casos de estudio: la primera corresponde a la Estación meteorológica automática - EMA²⁸ “Barcelona: Zona Universitaria”, la segunda corresponde a EMA “Barcelona: El Raval” y, por último, EMA “Barcelona: Zoo”. Los datos de estas estaciones meteorológicas automáticas permiten conocer las condiciones atmosféricas más favorables (temperatura más altas y bajas, ausencia de precipitaciones y vientos, son los más relevantes) para cada caso de estudio, con el propósito de establecer el mes, el periodo de días y las horas más adecuadas para realizar las mediciones en campo a nivel de superficie y aire tanto de día como de noche.

Los siguientes datos climáticos, proporcionan información como sustento para establecer el mes propicio para realizar las mediciones en campo:

- Resumen anual de EMA “Barcelona: Zona Universitaria”. Tabla de datos meteorológicos en formato PDF. Los datos relevantes seleccionados para este caso son: temperatura máxima media mensual (°C), amplitud térmica máxima mensual

²⁶ MDT: modelo del terreno que no incluye los objetos que están sobre superficie como: árboles, puentes o construcciones. (AMB, 2017)

²⁷ MDS: modelo del terreno que incluye algunos objetos que están sobre superficie como: puentes y algunas construcciones, pero no edificios. (AMB, 2017)

²⁸ EMA: Es la estación meteorológica automática que conforma la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (XEMA), que se creó en 1996, y gestiona el Servicio Meteorológico de Cataluña. (Servicio de Meteorología de Cataluña, s.f.)

(°C), media mensual de la irradiación solar global diaria (°C), velocidad media del viento mensual (m/s), humedad media relativa mensual (%) y precipitación mensual (mm).

- Resumen anual de EMA “Barcelona: El Raval”. Tabla de datos meteorológicos en formato PDF. Los datos relevantes seleccionados para este caso son: temperatura máxima media mensual (°C), amplitud térmica máxima mensual (°C), media mensual de la irradiación solar global diaria (°C), velocidad media del viento mensual (m/s), humedad media relativa mensual (%) y precipitación mensual (mm).
- Resumen anual de EMA “Barcelona: Zoo”. Tabla de datos meteorológicos en formato PDF. Los datos relevantes seleccionados para este caso son: temperatura máxima media mensual (°C), amplitud térmica máxima mensual (°C), media mensual de la irradiación solar global diaria (MJ/m²), velocidad media del viento mensual (m/s), humedad media relativa mensual (%) y precipitación mensual (mm).

Los siguientes datos climáticos se encuentran en el portal web como tablas y gráficos dinámicos del resumen diario desde hace dos años, contados a partir del año actual 2019, sin embargo, esta información data a partir del 10 de julio hasta el día del acceso de cualquier usuario.

A pesar de esa limitante, con esta información se fija el periodo de días más propicio para realizar las mediciones en campo, considerando las estaciones meteorológicas siguientes, por encontrarse próximas a los 2 casos de estudio:

- Datos de EMA “Barcelona: El Raval”. Los datos relevantes seleccionados para este caso son: Temperatura máxima (°C), humedad relativa media (%), precipitación acumulada (mm), racha máxima de viento - 10 (km/h), irradiación solar global (MJ/m²).
- Datos de EMA “Barcelona: Zoo”. Los datos relevantes seleccionados para este caso son: Temperatura máxima (°C), humedad relativa media (%), precipitación acumulada (mm), racha máxima de viento - 10 (km/h), irradiación solar global (MJ/m²).

4.2.3. Imágenes satelitales

Imagen satelital de Landsat-8 (Sensores: *OLI-Operational Land Imager* y *TIRS-Thermal Infrared Sensor*) con resolución de 30 m²/píxel para el sensor multi-espectral *OLI* y 100 m²/píxel para las bandas térmicas registrada en el portal web USGS-Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) correspondiente al 22 de julio de 2019, día más próximo a las fechas de las mediciones en campo -24 al 26 de julio- y porque contiene información completa del territorio de Barcelona, así como de calidad óptima para el posterior análisis.

- Landsat Collection 1 Level-1: Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level 1 (Level-1 GeoTIFF Data Product, 842.1MB)

La información de ésta imagen contribuye a tener mayor entendimiento del territorio urbano a través de la generación de 6 indicadores como: *Land surface temperature – LST* (diurna), *Normalized Difference Built up Index - NDBI*²⁹, *Index based Built up Index - IBI*, *Built up Index - BU*³⁰, *Albedo* y *Land Surface Emissivity - LSE*³¹ de los casos de estudio, a pesar de su limitada resolución (30m² x píxel para Landsat-8) en estudios del clima local, asimismo sirve como calibración de las posteriores mediciones en campo.

²⁹ NDBI (sigla en inglés): Índice de diferencia normalizada edificada, término en español

³⁰ BU (sigla en inglés): Índice de área construida, término en español

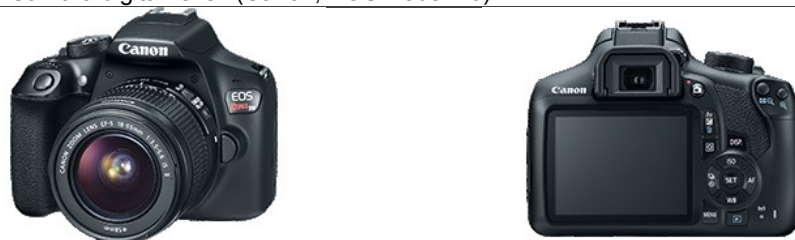
³¹ LSE (sigla en inglés): Emisividad de superficie o término en español

4.2.4. Medición en campo a escala local

Se realiza un recorrido “in situ” de los dos casos de estudio por dos motivos: primero para recabar, corroborar y completar información cartográfica que se ha descargado previamente, en el sub apartado 4.2.1., específicamente de: características del entorno urbano, altura y morfología de edificaciones, características del espacio público y tipos de coberturas de superficies horizontales en áreas públicas; y segundo, tomar mediciones en campo de los puntos que se establecen bajos criterios que permitan alcanzar los objetivos propuestos.

Primero, observar características de la morfología y tipología urbana. Esta información es recogida de modo subjetivo bajo criterios ya establecidos sobre la morfología y tipología urbana de entidades relacionadas al planeamiento y planificación urbana desde Cataluña hasta Barcelona, esto se realiza mediante apuntes: de forma escrita, con una base impresa de la cartografía; y digital, mediante fotografías con una cámara digital réflex (marca: Canon y tipo: EOS Rebel T6) con formato de imagen 22.3mm x 14.9mm y 18.00 megapíxeles efectivos, ambos apuntes sirven para la posterior comparación con los archivos descargados.

Figura 36: Cámara digital réflex (Canon, EOS Rebel T6)



Fuente: Canon - Latin America Group, 2019

Segundo, realizar mediciones diurnas y nocturnas de temperatura de aire -*LSAT*- y de superficie -*LST*- a escala local. Los dos tipos de mediciones se realizan mediante el uso de un Skywatch Windoo 3 y una cámara termográfica Flir E60” para los dos casos de estudio, pero en diferentes días debido a que no se dispone de más instrumentos para realizar de modo simultáneo las mediciones.

Para *LSAT* se utiliza el “Skywatch Windoo 3”, es un modelo de anemómetro que funciona como un sensor robusto y de máxima precisión a pesar de sus pequeñas dimensiones (5.6cm de alto x 1.8cm de diámetro), está equipado con una hélice multidireccional con rodamientos de zafiro, eje de acero inoxidable y sistema de transmisión magnético.

Este instrumento es compatible con dispositivos iOS y Android, y su uso como su alimentación se realiza únicamente mediante la conexión a la entrada de auriculares del dispositivo a utilizar, en este caso, un iPad Touch que se incluye en la lista de Smartphone compatibles de la página web.

Las funciones que presenta son muy variadas y se puede obtener la siguiente información: velocidad del viento mínima y máxima de 3 a 150 km/h (con precisión de $\pm 2\%$), temperatura mínima y máxima de -25°C a 60°C (con precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$), humedad relativa mínima y máxima de 5 a 100% RH (con precisión de $\pm 4\%\text{RH}$) y presión atmosférica mínima y máxima de 300 a 1100hPa (con precisión de $\pm 0.2\text{hPa}$). (Skywatch Windoo, 2014)

Figura 37: Skywatch Windoo



Fuente: JDC Instruments, 2014

Asimismo, este dispositivo dispone de captura de fotografía de las tomas realizadas en campo y mediante la plataforma en línea de Skywatch Windoo se puede obtener la información geográfica para luego ser comparadas con los puntos de medición diseñados previamente.

Para **LST** se utiliza la “Cámara termográfica Flir E60”, es una cámara térmica (24.6 x 9.7 x 18.4cm) con amplio campo de visión y adecuado para aplicaciones de edificación, de enfoque manual y fijo.

La función principal es la medición de temperaturas de rango -20 a 250°C, pero en temperatura de operación -15 a 50°C; respecto a la precisión de este modelo, tiene un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2\%$, que va a ser la diferencia normal entre la temperatura ambiente y de la escena, y se debe esperar 5 minutos para iniciar la primera toma de temperatura, sin embargo, también calcula emisividad y albedo.

Asimismo, esta cámara almacena imágenes en formato JPEG con datos de medición los cuales pueden ser descargados mediante un dispositivo externo USB o tarjeta Micro SD y analizar/tratar los datos almacenados mediante el software Flir. (Flir, 2014).

Figura 38: Cámara termográfica Flir E60



Fuente: Flir Systems Inc., 2014

4.3. Métodos de análisis

Este tercer apartado de la metodología desarrolla la revisión y análisis de la información recolectada para reorganizarlo y reclasificarlo mediante tablas dinámicas en el programa Microsoft Excel, en el sentido que sean válidos para la generación de capas en el programa Arcgis al culminar esta fase.

4.3.1. Definición de días para la medición en campo

Los datos meteorológicos de las 3 estaciones seleccionadas -El Raval, Zoo y Zona Universitaria- son procesadas mediante tablas dinámicas con formato condicional de

escalas de color, para mejor visualización, y gráficos tipo XY-Dispersión, ambos del programa Microsoft Excel.

La primera parte del análisis de este sub apartado, involucra el procesamiento de la información mensual de las 3 estaciones durante el periodo 2014 al 2018 con el propósito de conocer el mes con temperaturas más altas (además se consideran otras variables meteorológicas que también pueden contribuir al propósito), siendo el más propicio el mes de julio.

La segunda parte, corresponde al análisis de la información meteorológica diaria del mes de Julio, para establecer los días más adecuados para la medición en campo de los casos de estudio.

Las tres estaciones seleccionadas se encuentran actualmente operativas, las dos primeras desde el 2006 y la tercera desde el 2008. Las estaciones “Barcelona-El Raval” y “Barcelona-Zoo” se ubican en el distrito de Ciutat Vella a una altitud de 33m y 7m, y con sensores a una altura de 10m y 0m, respectivamente. La tercera estación se ubica en el distrito de Les Corts a una altitud de 79m cuyo sensor se ubica a 10m de altura.

Tabla 7: Datos de las estaciones El Raval, Zoo y Zona Universitaria

Cód.	Nombre de EMA	Altura sensor (m)	Lat.	Long.	Altitud (m)	UTM		Fecha de alta	Estado actual
						X (m)	Y (m)		
X4	El Raval	10	41.38390	2.16775	33	430 508	4 581 913	11/10/06	Operativa
X2	Zoo	0	41.38943	2.18847	7	432 246	4 582 511	22/09/06	Operativa
X8	Zona Universitaria	10	41.37919	2.10540	79	425 289	4 581 443	17/04/08	Operativa

Fuente: Elaboración propia con datos de Meteocat, 2019

Figura 39: EMA El Raval

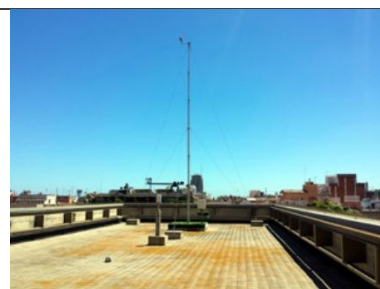


Figura 40: EMA Zoo



Figura 41: EMA Zona Universitaria

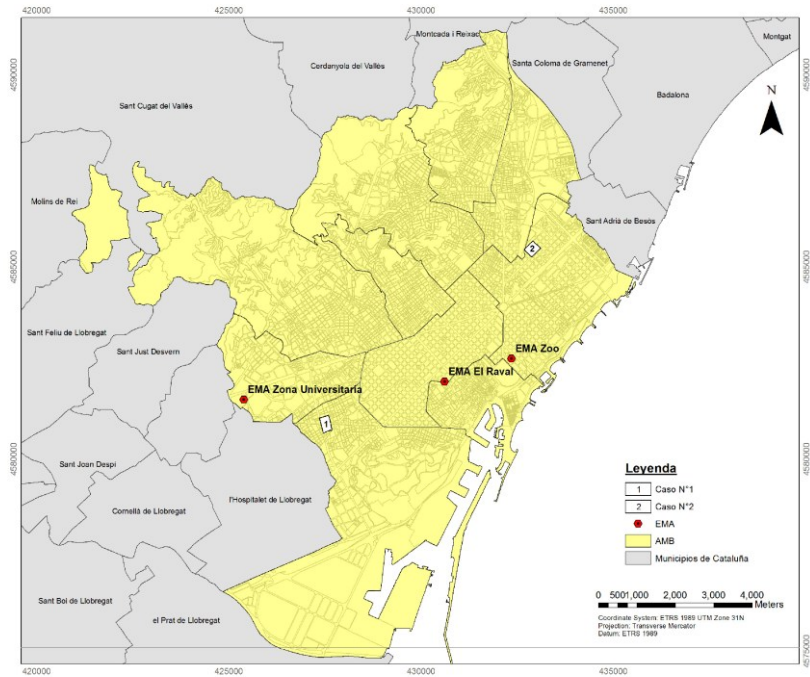


Fuente: Elaboración propia con imágenes de Meteocat, 2019

Si bien es suficiente contar con datos de las dos estaciones que se ubican próximos a los casos de estudio, se elige un tercero -EMA: Zona Universitaria- debido que EMA: Zoo no contaba con datos completos de algunas variables.

Por lo tanto, se distribuye dos estaciones respecto a cada caso de estudio de la siguiente manera, considerando la ubicación geográfica -altitud- y características del entorno urbano -altura del sensor y morfología urbana- (figuras 39, 40 y 41): se considera a EMA Barcelona Zona Universitaria - EMA Barcelona El Raval para el caso N°1 y EMA Barcelona Zoo - EMA Barcelona Zoo para el caso N°2.

Figura 42: Ubicación de estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas y casos de estudio



Fuente: Elaboración propia, con datos de Meteocat ,2019, e información del Ayuntamiento de Barcelona

El análisis de la media mensual de la temperatura de aire de las tres estaciones durante el 2014 al 2018, señala que los meses julio y agosto presentan mayor incidencia. La temperatura máxima obtenida para julio es de 31.3°C en 2015 y 2018, y para agosto alcanza 31.7°C en 2018, ambos registrados en EMA Barcelona: Zona universitaria.

Tabla 8: Temperatura máxima media mensual (°C) de estaciones El Raval, Zoo y Zona Universitaria, 2014-2018

Mes/Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
BARCELONA - EL RAVAL												
2014	15.2	16.1	17.7	20.4	21.2	26.5	28.0	27.7	26.1	24.7	19.4	15.1
2015	15.2	14.1	17.0	19.1	24.3	27.7	30.5	28.8	24.5	21.6	19.5	17.0
2016	16.3	17.0	16.7	19.0	21.6	26.1	28.9	28.8	27.5	21.8	18.0	16.4
2017	13.4	16.5	18.7	19.4	23.2	28.8	28.5	29.4	24.9	23.4	18.2	14.6
2018	16.3	12.3	17.3	19.8	22.3	26.5	29.9	30.3	27.0	22.6	18.0	16.7
BARCELONA - ZOO												
2014	14.9	16.1	17.9	20.4	20.9	25.5	27.4	27.3	25.7	24.1	18.7	14.2
2015	14.4	13.9	16.9	19.1	23.4	26.7	29.5	28.2	24.3	20.9	18.4	16.3
2016	16.0	17.3	17.3	19.2	21.8	26.1	28.8	29.0	27.7	21.7	17.7	15.5
2017	12.9	16.7	18.9	19.9	23.4	28.8	28.6	29.6	25.4	23.7	17.5	14.1
2018	15.9	12.5	17.6	20.0	22.5	26.5	29.7	30.2	27.3	22.4	17.5	15.8
BARCELONA - ZONA UNIVERSITARIA												
2014	14.5	15.4	17.3	20.1	21.6	27.2	28.3	28.2	27.2	25.0	18.9	14.0
2015	14.3	13.5	17.1	19.6	24.4	28.5	31.3	29.6	25.0	21.8	19.3	16.9
2016	15.6	16.7	16.5	18.6	21.7	26.9	29.7	29.6	27.9	21.9	18.0	16.4
2017	13.0	16.2	18.5	19.2	23.7	29.4	29.5	30.1	25.5	24.5	18.7	14.7
2018	16.5	12.6	17.3	20.1	22.9	27.2	31.3	31.7	27.7	22.9	17.5	16.1

Fuente: Elaboración propia con datos de Meteocat, 2019

El análisis de la media mensual de la irradiación solar global de las tres estaciones durante el 2014 al 2018, señala que los meses marzo, mayo y junio presentan mayor incidencia. No obstante, marzo y junio presentan mayor irradiación solar, 15.6°C en 2015 y 15.5°C en el 2017, respectivamente, ambos registrados en EMA Barcelona: Zona universitaria.

Tabla 9: Media mensual de la irradiación solar global (°C) de estaciones El Raval y Zona Universitaria, 2014-2018

Mes/Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
BARCELONA - EL RAVAL												
2014	8.5	9.7	12.3	11.6	10.1	11.0	10.7	8.3	7.7	9.5	11.1	9.1
2015	11.5	10.9	13.7	9.2	12.2	9.5	9.7	9.3	8.1	10.0	11.3	10.0
2016	9.8	11.1	11.2	10.5	13.3	9.3	8.8	8.3	9.7	8.4	8.8	9.4
2017	11.1	9.8	11.3	10.0	10.6	12.1	8.2	10.5	12.0	9.7	11.1	10.0
2018	8.7	9.9	11.5	9.7	12.9	10.5	10.3	9.8	10.7	10.2	8.7	10.5
BARCELONA - ZOO												
2014	11.2	11.4	15.0	11.8	11.1	11.5	11.2	8.5	9.0	11.6	12.1	10.1
2015	12.7	12.9	14.6	10.8	12.0	11.9	10.8	9.9	8.8	10.5	11.3	11.4
2016	11.7	14.6	13.4	12.2	14.9	11.9	10.0	11.4	11.0	10.6	9.6	11.5
2017	13.6	10.9	14.7	13.1	11.9	13.2	10.1	10.6	11.9	11.3	12.7	12.4
2018	10.9	12.8	13.3	11.7	13.2	10.8	10.0	10.1	12.6	13.1	10.8	12.2
BARCELONA - ZONA UNIVERSITARIA												
2014	10.4	12.9	14.9	12.8	13.6	12.7	12.3	11.1	12.1	13.8	12.9	11.7
2015	12.7	13.9	15.6	12.8	13.6	12.8	13.5	12.1	11.6	10.9	14.3	13.0
2016	12.0	12.0	13.1	12.9	14.9	12.0	12.0	13.5	13.2	11.1	11.1	12.7
2017	14.2	11.3	13.2	12.2	12.4	15.5	11.7	12.0	14.1	11.3	14.2	12.1
2018	11.0	12.2	12.8	11.2	14.0	12.8	12.3	11.9	12.4	11.9	11.4	12.0

Fuente: Elaboración propia con datos de Meteocat, 2019

El análisis de la media mensual de la humedad relativa de las tres estaciones durante el 2014 al 2018, señala que el mes con mayor humedad es octubre con 79% en 2016 registrado EMA Barcelona: Zoo, y los de menor humedad son los meses junio y julio con 55% y 58%, respectivamente, ambos registrados en EMA Barcelona: Zona universitaria.

Tabla 10: Humedad relativa media mensual (%) de estaciones El Raval, Zoo y Zona Universitaria, 2014-2018

Mes/Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
BARCELONA - EL RAVAL												
2014	66	59	59	67	66	61	63	69	74	69	69	59
2015	56	54	65	65	62	58	63	67	66	69	63	72
2016	59	57	59	65	66	59	62	63	62	73	67	66
2017	59	67	64	62	63	60	67	65	66	70	54	55
2018	61	68	62	69	73	71	71	67	72	71	72	69
BARCELONA - ZOO												
2014	73.0	64.0	65.0	72.0	72.0	69.0	70.0	74.0	80.0	77.0	76.0	68.0
2015	65.0	60.0	70.0	71.0	69.0	66.0	70.0	74.0	72.0	76.0	72.0	81.0
2016	64.0	63.0	64.0	69.0	71.0	65.0	69.0	68.0	68.0	79.0	72.0	76.0
2017	65.0	71.0	68.0	67.0	68.0	66.0	71.0	70.0	71.0	75.0	62.0	61.0
2018	66.0	68.0	65.0	72.0	76.0	74.0	73.0	71.0	78.0	77.0	79.0	76.0
BARCELONA - ZONA UNIVERSITARIA												
2014	68.0	61.0	59.0	67.0	66.0	58.0	61.0	67.0	73.0	69.0	72.0	63.0
2015	59.0	57.0	64.0	64.0	59.0	55.0	58.0	65.0	66.0	70.0	65.0	75.0
2016	60.0	57.0	59.0	65.0	64.0	56.0	58.0	58.0	61.0	75.0	68.0	67.0
2017	61.0	67.0	63.0	62.0	60.0	56.0	62.0	62.0	67.0	74.0	58.0	58.0
2018	65.0	68.0	62.0	67.0	69.0	66.0	65.0	64.0	74.0	72.0	75.0	70.0

Fuente: Elaboración propia con datos de Meteocat, 2019

El análisis de la precipitación mensual de las dos estaciones durante el 2014 al 2018, señala que los meses de mayor precipitación son setiembre, octubre y noviembre específicamente en 2018 -alcanzando los 271.1mm registrados en EMA Barcelona: Zona universitaria-, y los meses de menor precipitación son los meses junio y julio con 3.5mm y 5mm, respectivamente, ambos registrados en EMA Barcelona: El Raval.

Tabla 11: Precipitación mensual (mm) de estaciones El Raval y Zona Universitaria, 2014-2018

Mes/Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
BARCELONA - EL RAVAL												
2014	56.9	25.9	15.5	42.9	44.7	34.8	48.9	67.2	125.3	5.9	128.4	29.0
2015	12.2	8.8	63.0	10.2	42.0	3.5	5.0	32.7	53.0	74.6	25.6	0.1
2016	1.2	47.2	22.5	69.6	24.1	19.9	11.9	1.2	35.4	114.2	41.7	33.3
2017	28.1	23.0	126.5	40.9	13.5	17.2	14.7	19.2	40.8	104.1	10.0	4.1
2018	55.4	89.6	79.1	48.6	87.6	12.9	24.7	96.2	154.8	187.9	168.8	4.6
BARCELONA - ZONA UNIVERSITARIA												
2014	33.6	23.6	21.7	52.5	51.0	21.1	46.9	43.3	135.1	7.0	144.6	27.3
2015	11.7	13.8	47.9	11.5	20.3	13.4	6.9	37.5	57.4	54.7	26.7	0.7
2016	1.2	33.5	29.1	68.3	26.0	18.6	11.7	0.8	78.2	77.0	44.7	30.9
2017	34.4	31.9	121.6	42.1	14.0	20.5	7.0	19.9	54.2	104.2	11.6	2.9
2018	55.6	108.7	104.3	53.8	41.8	52.5	12.4	47.3	93.9	217.1	128.0	4.4

Fuente: Elaboración propia con datos de Meteocat, 2019

Por lo tanto, en este primer sub apartado, el mes más favorable para realizar las mediciones en campo es julio, debido a que es un mes que registra temperaturas máximas medias junto a otras variables que contribuyen a hacerla adecuada como son: mayor irradiación solar global, menor humedad relativa y precipitaciones.

Una vez establecido julio como el mes seleccionado, es necesario analizar la información de temperaturas máximas diarias de las estaciones públicas El Raval y Zoo, de los años 2017 -información disponible a partir del 10 de julio- y 2018 porque ambas tienen altitudes similares a los dos casos de estudio.

Tras el análisis, se observa que en 2018 se registran temperaturas más elevadas respecto al 2017; durante el 2017 se registran picos de temperaturas superiores a 30.5°C los días 12 y 18 en EMA Barcelona: El Raval, mientras que, durante el 2018, se presentan en periodos más largos como del 8 al 10, 14 y 25 al 31 en ambas estaciones.

Tabla 12: Temperatura máxima diaria (°C) de estaciones El Raval y Zoo, 2017-2018

Año / Mes	2017		2018	
	EMA EL RAVAL	EMA ZOO	EMA EL RAVAL	EMA ZOO
JULIO				
1			27.2	27.6
2			27.6	28.3
3			30.1	29.9
4			28.7	28.5
5			29.1	29.0
6			27.2	27.9
7			29.1	29.8
8			31.4	30.8
9			31.8	31.9
10	27.6	28.5	30.5	30.5
11	27.9	28.5	29.1	29.6
12	30.9	30.3	28.5	27.8
13	29.1	28.7	29.4	28.5
14	26.6	25.7	31.9	31.3
15	30.0	29.6	28.9	29.7
16	28.6	25.7	30.5	28.5

17	28.2	29.6	29.3	30.1
18	31.6	29.2	28.4	28.9
19	29.5	29.8	29.7	29.7
20	27.9	28.2	30.4	29.9
21	29.7	29.4	29.7	29.0
22	29.3	29.7	26.7	27.0
23	27.5	28.3	29.7	29.4
24	29.2	28.9	29.8	29.6
25	27.3	27.8	32.0	31.4
26	26.0	27.0	33.5	32.0
27	29.8	30.3	31.6	31.3
28	28.4	29.3	30.8	29.6
29	29.0	29.9	30.4	30.2
30	29.6	29.9	31.2	30.9
31	28.2	28.9	32.1	31.8

Fuente: Elaboración propia con datos de Meteocat, 2019

No obstante, se debe considerar otros factores que son relevantes para establecer los días como: la disponibilidad de uso de los dos instrumentos -anemómetro (Skywatch Windoo 3) y cámara termográfica (Flir E60)- que, en este caso, se facilita a partir del 22 de julio de 2019; a partir de ello, se realiza otro análisis, pero de las predicciones del tiempo de día y noche, para la ciudad de Barcelona, de las dos últimas semanas de julio a través del portal web de Accuweather (<https://www.accuweather.com/es/es/spain-weather>).

En este periodo de tiempo seleccionado -dos últimas semanas de julio 2019-, las temperaturas máximas superan los 27°C, alcanzando los 30°C en dos periodos: del 22 al 26 y del 29 al 31 de julio, pero al considerar otras variables, desde 27 de julio se observa mayor probabilidad de nubosidad, vientos y precipitaciones. Por tanto, los días que predicen datos y probabilidades similares son del 23 al 26 de julio 2019.

Tabla 13: Predicciones del tiempo de las dos últimas semanas de julio, 2019

Día	Temperatura máx. (°C)	Temperatura mín. (°C)	DÍA			NOCHE		
			Nubes	Viento	Precip.	Nubes	Viento	Precip.
22	30.0	23.0	8%	11	0%	1%	9	0%
23	31.0	22.0	0%	13	0%	0%	7	0%
24	31.0	22.0	0%	11	0%	6%	7	0%
25	31.0	21.0	6%	13	0%	6%	13	1%
26	30.0	22.0	11%	13	4%	24%	9	7%
27	28.0	21.0	24%	15	11%	16%	7	13%
28	27.0	20.0	39%	13	25%	10%	9	15%
29	30.0	24.0	21%	11	9%	1%	7	2%
30	31.0	23.0	8%	9	0%	55%	6	1%
31	31.0	23.0	41%	11	1%	15%	7	1%

Fuente: Elaboración propia con datos de Meteocat y Accuweather, 2019

Finalmente, considerando los factores expuestos, el periodo de días para la medición en campo de los dos casos de estudio se estima en tres días, del 24 al 26 de julio de 2019, y en cuatro rangos horarios (11:00,14:00, 18:00 y 00:00).

El primer y último rango horario se establecen tras la revisión histórica horaria mensual, siendo las 14:00 cuando se registran mayores temperaturas y las 00:00 del día siguiente las menores; los otros dos rangos se consideran con el propósito de evaluar las temperaturas de las coberturas en superficies horizontales del espacio público condicionadas a las distintas disposiciones bajo el efecto de sol y sombra de edificaciones durante el día, y su variación respecto al de la noche.

El tiempo de los rangos horarios establecidos varía entre 1 hora a 1 hora 30 minutos, para la medición de 17 a 22 puntos de medición, si se realiza de manera continua a cargo de dos personas quienes manejan un instrumento simultáneamente, como se realiza en esta investigación.

Tabla 14: Fecha y hora de campañas de medición

	FECHA	CÓDIGO RANGO HORARIO	RANGO HORARIO	TIEMPO DEL RANGO HORARIO	PUNTOS MEDICIÓN
Caso N°1 - Día	24/07/2019	RH1	11:30 – 13:00	1h 30min	1 al 22
Caso N°1 - Día	24/07/2019	RH2	14:30 – 15:30	1h 0min	
Caso N°1 - Día	24/07/2019	RH3	18:30 – 20:00	1h 30min	
Caso N°1 - Noche	25/07/2019	RH4	00:30 – 02:00	1h 30min	
Caso N°2 - Día	25/07/2019	RH1	11:00 – 12:30	1h 30min	1 al 17
Caso N°2 - Día	25/07/2019	RH2	14:00 – 15:30	1h 30min	
Caso N°2 - Día	25/07/2019	RH3	18:00 – 19:30	1h 30min	
Caso N°2 - Noche	26/07/2019	RH4	00:00 – 01:30	1h 30min	

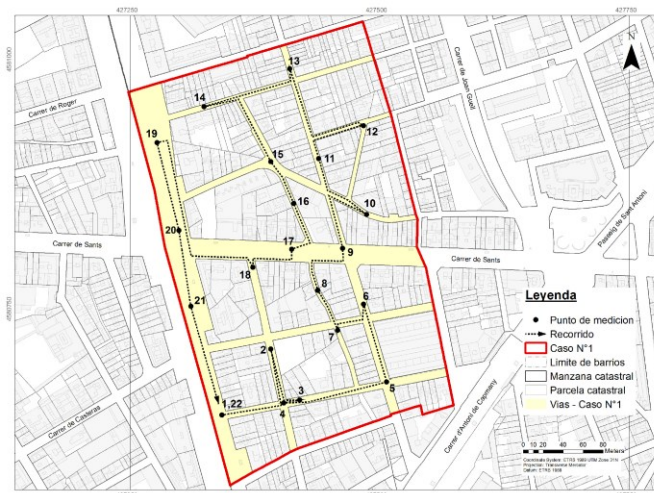
Fuente: Elaboración propia con datos registrados en campo del 24/07/2019 al 26/07/2019

4.3.2. Definición de puntos para la medición en campo

Definir la ubicación de los puntos implica previamente conocer físicamente los ámbitos de estudio, por lo que se realiza una visita por cada caso de estudio, es decir, determinar las características de la morfología urbana y tipología de coberturas en superficies horizontales del espacio público particulares es el punto de partida. Lo siguiente, consiste en que los puntos cubran el ámbito de cada caso, se distribuyan del modo más homogéneo y la distancia entre puntos sea similar -considerando que el promedio sea de 3 a 4 minutos-. Este último dato permite precisar finalmente la cantidad total de puntos para la medición y el recorrido -en el sentido se realice lo más rápido posible y la medición total no supere 1 hora 30 minutos-.

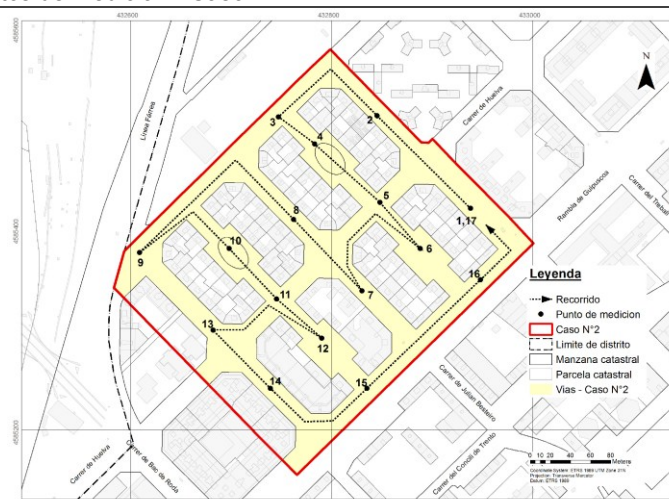
En total se registran 39 puntos, recorridos en 3.5km para las mediciones entre los dos casos: 22 puntos recorridos en 1.77km para el caso N°1 y 17 puntos, en 1.73km para el caso N°2. En ambos casos el recorrido se plantea en circuito cerrado, es decir, el punto inicial es también el final con el propósito de comparar la misma información que varía en el lapso de tiempo tomada entre una y otra, y concluir en una media.

Figura 43: Puntos de medición - Caso N°1



Fuente: Elaboración propia con información del Ayuntamiento de Barcelona
Escala 1:900

Figura 44: Puntos de medición - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con información del Ayuntamiento de Barcelona
Escala 1:900

4.3.3. Reclasificación de capas cartográficas

La información digital de la cartografía descrita en el sub apartado 4.2.1., presenta capas con características elementales de la cartografía como polígonos de manzanas y parcelas, y de la topografía (detalle del diseño de vías y área edificada de parcelas) mediante líneas y polígonos; sin embargo, para alcanzar el detalle de tipología de coberturas en superficies horizontales del espacio público es necesario realizar un tratamiento manual y automático a estas capas.

Una vez obtenida la capa de tipología de coberturas que sirve como base, se genera la capa de sombras para tres rangos horarios -RH1, RH2 y RH3-, debido que el cuarto -RH4- rango horario se realiza por la noche; las tres capas de sombras y tres capas sin sombras se aplican para los dos casos de estudio.

- La “capa de perímetro” de los casos de estudio se proyecta delineando manualmente los vértices del polígono en ArcGIS, sobre límite de parcelas y ejes viales.
- La “capa de tipología de coberturas” de los casos de estudio se genera mediante unión (*merge*) de *shapefile* creados por tipo de cobertura se establezcan físicamente. Cada *shapefile* se conforma como polígonos, de una misma cobertura, que son delineados manualmente sobre la base de la ortofoto e inspección en campo en ArcGIS.
- Las “tres capas de sombras”, de los casos de estudio se generan en tres pasos utilizando dos softwares (ArcGIS-SketchUp- ArcGIS): primero, se exporta la capa topográfica de polígonos del área edificada en formato dwg al SketchUp, segundo, se genera altura de volúmenes (*extrude*) según Datos LIDAR y activa las sombras en los tres rangos horarios predeterminados, por lo que se exporta el plano de las sombras -modo visualización 2D y formato dwg o jpg- en tres archivos por cada caso de estudio. Finalmente, se añaden las capas editadas al Arcgis como polígonos.
- Las “dos capas de coberturas con y sin sombras de los tres rangos horarios” para cada caso de estudio, se generan mediante la comparación y extracción de la “capa de tipologías de coberturas” y las “tres capas de sombras”. Estas capas se exportan a ArcGis y originan *shapefiles* de coberturas bajo efectos de sol y sombra, que se unirán posteriormente de acuerdo a cada rango horario según caso de estudio.

4.3.4. Cálculo de áreas por tipología de coberturas y efectos de sol - sombra

Las capas generadas previamente por cada caso de estudio, presentan información estadística de área que son exportadas a una tabla de Excel para ser editadas y obtener los porcentajes; de este modo, se consigue cuantificar -en metro cuadrado y porcentaje: tipología de coberturas del espacio público (tabla 15, figura 46), áreas bajo efectos de sol y sombra en superficies del espacio público (tabla 16) en el primer rango horario (figura 47), segundo rango horario (figura 48), tercer rango horario (figura 49) y cuarto rango horario -del día siguiente-, y tipología de coberturas del espacio público bajo efectos de sol y sombra en el primer rango horario (tabla 17), segundo rango horario (tabla 18), tercer rango horario (tabla 19) y cuarto rango horario -del día siguiente-; aplicado para los dos casos de estudio.

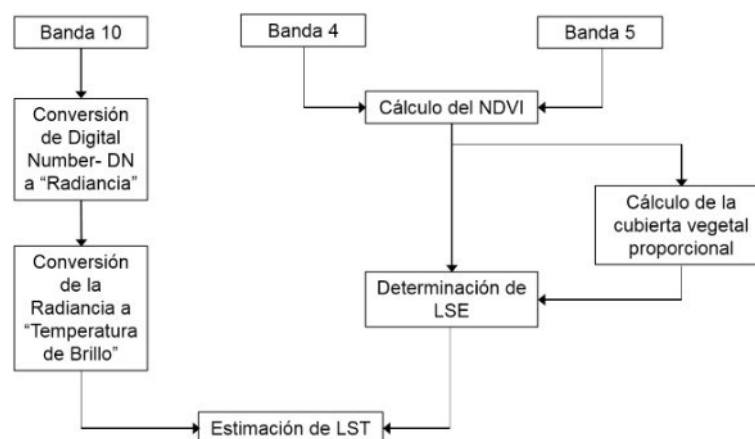
4.3.5. Análisis de imágenes satelitales mediante teledetección

Las imágenes satelitales detalladas en el sub apartado 4.2.3., permiten obtener *i.* las temperaturas de superficie (*LST*) diurna, *ii.* indicadores de urbanización (*NDBI*, *IBI*, *BU*) y *iii.* otros indicadores de propiedad de superficies como albedo y *LSE*. La información de los valores generados sirven para mapificar los ámbitos de los casos de estudio y reconocer el alcance de su detalle en la investigación, a pesar de sólo alcanzar una resolución de 30m por pixel. En el mismo sentido, se describe el proceso de análisis por teledetección y las fórmulas requeridas para obtener los seis indicadores mencionados.

Primero, preparar las imágenes satelitales mediante la georreferenciación en coordenadas ETRS_1989_UTM_Zone_31N, recorte de imágenes de bandas 2,3,4,5,6,7 y 10 con el polígono del perímetro de los casos de estudio, definición de valores nulos (en caso el polígono intersecte con valores 0 o marcos negros de la imagen).

Segundo, realizar ajustes geométrico y atmosférico mediante la obtención de la “reflectancia” respecto a elevación del sol (conversión de Digital number-DN a reflectancia de bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7), obtención de la “radiancia” (conversión de Digital numbers-DN a radiancia de banda térmica 10) y obtención de la “temperatura de brillo” (corrección atmosférica de la radiancia). Finalmente, se pueden extraer datos y aplicar las fórmulas siguientes para alcanzar los siguientes indicadores.

Figura 45: Diagrama para la obtención del *LST*



Fuente: Sun Q., Tan J. & Xu Y., 2010, p. 1048

A lo anteriormente detallado, se debe establecer los índices de *NDVI* y *LSE* según el método utilizado para cálculo del *Land Surface Temperature*. Por lo tanto, el *NDVI* identificar diferentes tipos de cobertura del suelo y se calcula mediante la diferencia normalizada entre dos bandas usando la fórmula siguiente:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})}$$

Landsat-8:
Banda RED= 4
Banda NIR= 5

- *Land Surface Emissivity (LSE)*. Es la emisividad media de transmisión de la energía terminal de la superficie y se calcula por medio del “NDVI threshold method” (Sobrino and Raissouni, 2000), método que estima la emisividad de la superficie para pixels desnudos o impermeables.

$$\varepsilon_{\lambda} = \begin{cases} a_{\lambda} + b_{\lambda}\rho_{red}, & NDVI < NDVI_s \\ \varepsilon_{v\lambda}P_v + \varepsilon_{s\lambda} \times (1 - P_v) + C_{\lambda}, & NDVI_s \leq NDVI \leq NDVI_v \\ \varepsilon_{v\lambda} + C_{\lambda}, & NDVI > NDVI_v. \end{cases}$$

Banda RED= 4
P_v= Proporción de vegetación - FVC
E_v= Emisividad de la vegetación
E_s= Emisividad de la superficie
C=Rugosidad de superficie

- *Land surface temperature (LST)*, día. La fórmula, desarrollada por Artis y Carnahan (1982) en esta investigación permite realizar una aproximación de temperaturas de superficies a escala local y hacer una comparación con las temperaturas de superficie registradas en campo durante tres rangos horarios de día.

$$T_{LST} = \frac{T}{\left(1 + \left[\frac{\lambda \cdot T}{\rho} \cdot \ln(\varepsilon)\right]\right)}$$

Landsat-8:
T=temperatura de brillo
p= 14380 Constante de Planck & Boltzman
e=emisividad
y= 10.8950 Longitud de onda de banda 10 de Landsat 8

$$T_{LSTc} = T_{LST} - 273.15$$

- *Normalized Difference Built up Index (NDBI)*. La fórmula, desarrollada por Zha, Gao y Ni (2003), se establece con el propósito de determinar la intensidad acumulada del terreno; el rango de valores comprende de -1 a +1.

$$NDBI = \frac{(\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR})}$$

Landsat-8:
Banda SWIR1= 6
Banda NIR= 5

- *Index based Built up Index (IBI)*. La fórmula, desarrollada por Xu (2008), se establece para determinar las características de terrenos edificados; el rango de valores comprende de -1 a +1.

$$IBI = \frac{\left[\frac{2 \times \rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} + \frac{\rho_{GREEN}}{\rho_{GREEN} + \rho_{SWIR1}} \right) \right]}{\left[\frac{2 \times \rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} + \frac{\rho_{GREEN}}{\rho_{GREEN} + \rho_{SWIR1}} \right) \right]}$$

Landsat-8:
Banda SWIR1= 6
Banda NIR= 5
Banda RED= 4
Banda GREEN= 3

- **Built up Index (BU).** La fórmula, desarrollada por Zha, Gao y Ni (2003), se establece para identificar las zonas edificadas; el rango de valores comprende de -1 a +1.

$$BU = \left(\frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} \right) - \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \right)$$

Landsat-8:
Banda SWIR1= 6
Banda NIR= 5
Banda RED= 4

- **Albedo.** La fórmula, desarrollada por Liang (2003) y normalizada los algoritmos para ser usada con Landsat 8 por Smith (2010), se establece para calcular el porcentaje de luz reflejada por las superficies terrestres; el rango de valores comprende de 0 a +1.

$$\alpha_{short} = \frac{0.356\rho_{blue} + 0.130\rho_{red} + 0.373\rho_{NIR} + 0.085\rho_{SWIR1} + 0.072\rho_{SWIR2} - 0.0018}{0.356 + 0.130 + 0.373 + 0.085 + 0.072 - 0.0018}$$

Landsat-8:
Banda SWIR1= 6
Banda SWIR2= 7
Banda NIR= 5
Banda RED= 4
Banda BLUE= 2

Al haber obtenido los valores medios del *LST* día, *NDBI*, *IBI*, *BU*, Albedo, *LSE* - correspondientes a Landsat-8, se calcula un valor medio para cada punto de medición, según sea el caso de estudio y se exportan en tablas a Excel.

4.3.6. Obtención de modelos ráster *LSAT* y *LST* a escala local

La información de las variables de temperatura de aire, humedad relativa, velocidad de viento y presión atmosférica, tomadas en las mediciones en campo en tres rangos horarios de día -RH1, RH2 y RH3- y el cuarto rango horario de noche -RH4-, se registra en la aplicación de Skywatch Windoo 3 o mediante captura de pantalla; ésta información se descarga y edita en tablas dinámicas de Excel. Estas tablas se añaden para generar cuatro capas de puntos georreferenciados en ArcGIS, por cada caso de estudio, y mediante una interpolación con barreras estos puntos generan un ráster por variable, a escala local.

La información de la temperatura de superficies bajo efectos de sol y sombra, tomadas en las mediciones en campo durante tres rangos horarios de día - RH1, RH2 y Rh3- y el cuarto rango horario de noche -RH4-, se registra en la memoria de la cámara termográfica Flir E60; ésta información se descarga y edita en Excel, luego se asigna los valores correspondientes a cada material de cobertura bajo efectos de sol y sombra como se muestran en la tabla 22, para el primer y segundo caso de estudio. Finalmente, éstas tablas se añaden en ArcGIS.

4.3.7. Definición de variables de la estructura urbana

La determinación de las variables de la estructura urbana es relevante debido que son las edificaciones elementos relevantes en la conformación de las áreas urbanizadas y que tanto su disposición como volumen pueden influir en el clima a escala local y microclima. Por tanto, estas variables que incluyen a la verticalidad, *aspect ratio*, intensidad edificatoria, ancho de vía y orientación, sirven para evaluar el impacto de modificación que genera la estructura urbana sobre el clima urbano -como *LSAT*, humedad relativa, velocidad de viento y *LST* día-.

El análisis y cálculo de estas variables se realiza en Arcgis, la información de éstas se exporta a tablas dinámicas de Excel donde se edita y reorganiza para el posterior procesamiento de Correlación de Pearson.

- Intensidad edificatoria. Total, del suelo designado a cada parcela catastral, ésta variable considera la superficie de parcela urbana (spu), la altura entre niveles (h) y número de niveles edificados por cada predio (n). Al haber calculado la intensidad edificatoria por parcela catastral, se determina un promedio para cada punto de medición según las parcelas que se involucren dentro de un diámetro de 20.00m y 30.00m para la Rambla de Badal -por ser una vía de mayor ancho-, así como las que se ubican en el caso N°2.

$$I_e = \sum n (spu * h)$$

- Verticalidad (m). Altura promedio de edificaciones por parcela catastral, según la altura entre niveles (h) y número de niveles edificados (n). Para asignar un valor de verticalidad a cada punto de medición, se determina un promedio de todas las parcelas que se ubican a lo largo de vía correspondiente.

$$V = \sum (n * h)$$

- Ancho de vía (m). Ancho de vías o separación de edificaciones, en esta investigación se calcula un valor promedio de los anchos que se registren a lo largo de cada vía donde se ubique cada punto de medición, asignándosele ese valor.
- *Aspect ratio* (h/w). Cociente entre el valor de la altura de edificaciones y ancho de vías o separación de edificaciones. Al tener calculados el promedio de las alturas de edificaciones por parcela catastral y el promedio de ancho de vías, se realiza la fracción para determinar un valor para cada punto de medición.
- Orientación (°). Ángulo de dirección de las manzanas catastrales, en este caso se asigna -a cada punto de medición- el ángulo de dirección predominante de las manzanas catastrales próximas.

4.4. Métodos de Procesamiento

Este cuarto apartado de la metodología desarrolla dos métodos de procesamiento de la información de las variables climáticas y morfológicas previamente analizadas y revisadas. Primero, generar un modelo ráster de *LST* con resolución de 2.5m² por pixel de día mediante el programa ArcGis. Segundo, relacionar los datos de las variables para conocer el grado de implicancia que tiene sobre la temperatura y otras propiedades de la superficie mediante el programa IBM SPSS Statistics.

4.4.1. Modelo ráster de *LST* a escala local (resolución 2.5m² por pixel)

Se considera generar una malla de 2.5m x 2.5m por celda que cubra el ámbito de los casos de estudio en ArcGIS, con el propósito de asignarle una temperatura de superficie promedio a cada celda y realizar un análisis más cercano, simulando una imagen satelital, pero con mayor resolución y compararlo con los generados por Landsat-8.

El primer método consiste en unir las capas de las tipologías de coberturas de superficie bajo efectos de sol y sombra con datos de *LST* registrados en campo, en ArcGIS; esta operación se realiza para los dos casos de estudio y se generan 1 capa por caso de estudio, resultando 2 capas en total de *LST* a escala local, la misma cantidad de malla a generar, los que se detallan a continuación:

Para el caso N°1:

- Capa de tipología de coberturas en superficies horizontales bajo efectos de sol y sombra de edificaciones, y datos *LST* día, rango horario 2

Para el caso N°2:

- Capa de tipología de coberturas en superficies horizontales bajo efectos de sol y sombra de edificaciones, y datos *LST* día, rango horario 2

El segundo método, involucra el cálculo de la temperatura de superficie promedio por celda y se analiza a través de los porcentajes, la proporción de los tipos de cobertura de superficie que existan por celda. Se genera una tabla con información de *LST* promedio de coberturas por celda para cada capa mencionada previamente, y se une cada tabla con la capa de la malla de 2.5m x 2.5m por celda. Finalmente, estas últimas capas se exportan a modelo ráster y se deja como valor de celda el valor promedio de *LST* rango horario 2.

4.4.2. Relación de funciones mediante Correlación de Pearson y Regresión Lineal

Este sub apartado propone establecer el grado o fuerza de asociación lineal de las variables climáticas y morfológicas a través del coeficiente de Correlación de Pearson, y, por otro lado, habiendo determinado las variables con más relaciones a la temperatura de superficie se cuantifica mediante la Regresión Lineal de Pearson (r^2) y se demuestra con gráficos de Dispersión lineal; esto dos pasos se llevan a cabo en IBM SPSS Statistics, software que realiza este tipo de análisis estadísticos de datos y ser representados en gráficos.

El coeficiente de Correlación de Pearson permite evaluar el ajuste a una recta lineal la relación de dos variables cuantitativas y puede considerar valores entre -1 a +1, siendo 1 el valor de relación de mayor intensidad. Esta correlación no diferencia las variables dependientes e independientes, y de modo general, se considera una correlación baja menor a 0.30, correlación moderada de 0.30 a 0.70 y correlación alta de 0.70 a 1.00. En este caso particular, los datos de las variables se agrupan en tres tablas para conocer los coeficientes más altos y particulares en el contexto de cada caso de estudio.

- La primera tabla que involucra variables climáticas registradas en campo, las registradas en estaciones públicas y variables de la morfología, se propone para valorar: el impacto de la estructura urbana en el clima local urbano y microclima, y la relación fiable de los datos registrados por las estaciones públicas más próximas a los casos de estudio respecto a los registrados en campo.
- La segunda tabla que involucra las dos variables climáticas que influyen en la generación de la isla de calor urbana -la temperatura de aire y temperatura de superficie, ambos registrados en campo-, temperatura de superficie de día por Landsat-8 y variables de la morfología, se propone para valorar: la relación que existe entre la temperatura de aire y superficie, y el impacto de la estructura urbana en la temperatura de superficie, durante el día y noche.

- La tercera tabla que involucra la temperatura de superficie de día y noche registradas en campo, los seis indicadores por Landsat-8 y variables de la morfología, se propone para reconocer la relación próxima de los datos extraídos de la imagen satelital de Landsat-8 y los datos registrados en campo, y si estos indicadores establecen alguna asociación con variables de la morfología.

El coeficiente de determinación (R^2) de la Regresión Lineal Simple establece la relación de dos variables cuantitativas - “X” variable explicativa o independiente, “Y” variable explicada o dependiente- y explica la proporción de variación de la variable dependiente a través de la independiente. Los valores que toma son de 0 a 1, siendo el valor 1 el de máxima relación.

Por lo tanto, se procede a calcular el coeficiente de determinación y graficar en un cuadrante de puntos, la tendencia de las variables morfológicas -como variables independientes- y las climáticas -como variables dependientes-.

CAPITULO V. DESARROLLO DE CASOS DE ESTUDIO

Este capítulo aborda el proceso que se desarrolla con el objeto de generar modelos ráster del *LST* con resolución de 2.5m x 2.5m por pixel y modelos de regresión lineal de las variables climáticas y morfológicas más relevantes con el uso de información recolectada de diversas fuentes y metodología descrita previamente, en el capítulo 4.

Para obtener los modelos ráster, primero es necesario establecer la tipología de coberturas existente sobre las superficies horizontales de los espacios públicos y el comportamiento bajo efectos de sol y sombra proyectados por las edificaciones sobre las superficies durante el día y noche para los dos casos de estudio; asimismo, cuantificar en metro cuadrado y porcentaje: el área ocupada de los tipos de cobertura, área bajos efectos de sol y sombra, y áreas compuestas las mencionadas previamente.

Segundo, realizar modelos de simulación de las temperaturas de superficies (*LST*) diurna, *NDBI*, *IBI*, *BU*, albedo y *LSE* según las imágenes satelitales de Landsat 8, asimismo, para las temperaturas de aire (*LSAT*), humedad relativa, velocidad de viento y temperaturas de superficies, registrados según mediciones en campo.

5.1. Cuantificación de la tipología de coberturas y efectos de sol - sombra

Los dos casos de estudio presentan similar tipología de coberturas como asfalto color negro para las calzadas, panot “4 tabletas” y losetas de hormigón para las aceras y áreas de suelo desnudo o poca vegetación. En el caso de Sants (Figura 46, a), al tener vías más angostas cuyo acceso prioriza al peatón antes que al vehículo -tras las obras de pavimentación hace un par de años-, se considera otros materiales para las aceras como el panot “La Flor” y adoquines de color: gris y terracota; mientras que en el caso de Sant Martí de Provençals, al plantear cuatro plazas en dos de sus ejes viales -Carrer Alcalá de Guadaira al este y Carrer Dr. Zamenhof al oeste- se emplea como recubrimiento asfalto color rojo y arena para los dos espacios de recreación infantil.

Figura 46: Tipología de coberturas en superficies horizontales de los casos de estudio: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2



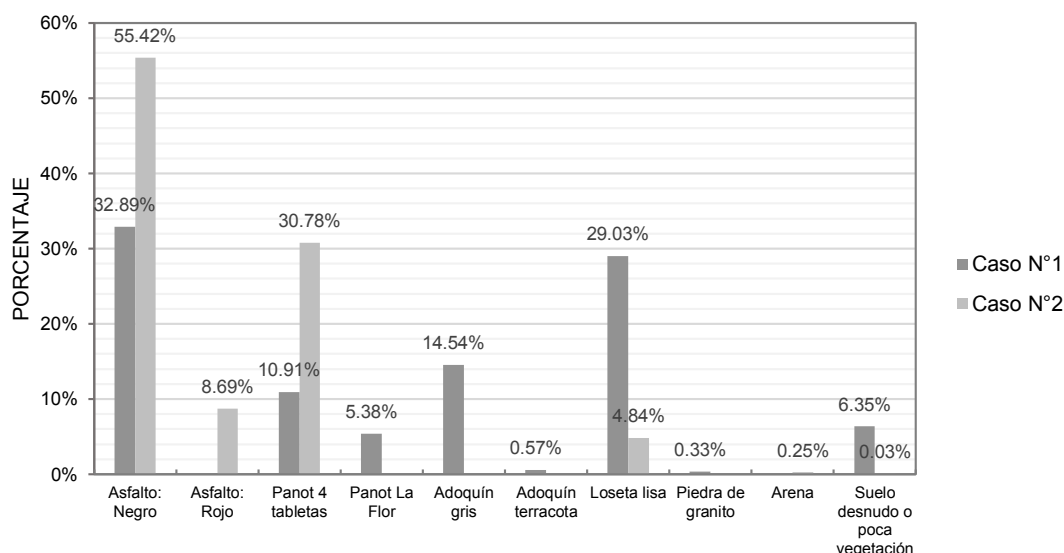
Fuente: Elaboración propia con información del Ayuntamiento de Barcelona y registro en campo

En el capítulo 4 apartado 4.1 sub apartado 4.1.1, se detalla 27,347.54 m² de área vial para el Caso N°1, pero para el desarrollo posterior, se toma en cuenta dos parcelas por ser de propiedad y uso público actual: la parcela 11 de la manzana 72030 como huerto (872.90m²) y la parcela 3 de la manzana 72053 como vía peatonal (162.16m²), por lo tanto, la nueva área resulta 28,382.60m².

El asfalto color negro es el tipo de cobertura que tiene mayor predominancia en los dos casos de estudio, pero el segundo alcanza los 55.42% superando al primero en 22.53%, con motivo que el segundo alberga mayor área de calzadas (figura 46, b). Luego, siguen la loseta de hormigón color gris con 29.03% y el adoquín de hormigón color gris con 14.54% para el primer caso -ambos son tipos coberturas para las calzadas a nivel vecinal-; el panot "4 tabletas" de cemento hidráulico (30.78%) y asfalto color rojo (8.69%) para el segundo caso -tipo de coberturas para las aceras-.











Los panots se emplean como coberturas de las aceras en los dos casos de estudio y si sólo se refiere a este tipo, el segundo caso -con un solo tipo de panot- casi duplica (30.78%) al primero -con dos tipos de panots- con una suma que alcanza 16.29%. El adoquín se emplea sólo en el primer caso el de color gris con 14.54% para la circulación de vehículos y peatón, y el de color terracota con 0.57% para cuadrantes de intercambios vial. La loseta de hormigón para el primer caso con 29.03% se emplea en las aceras a lo largo de la Rambla de Badal y Carrer de Sants, mientras que es considerablemente menor con 4.84% para el segundo caso donde se ubican en aceras de dos ejes perimetrales. Respecto al suelo desnudo o con poca vegetación, el primer caso alberga 6.35% tanto en el huerto y en Rambla de Badal, superando considerablemente al segundo caso (0.03%); cabe recordar en este tipo de cobertura, que se ha cuantificado espacios de áreas relevantes que superen los 10m². La piedra de granito y la arena son los dos tipos de coberturas menos predominantes con 0.33% y 0.25% para el primer y segundo caso de estudio, respectivamente.

Figura 47: Comparación porcentual de la tipología de coberturas en superficies horizontales de los casos de estudio



Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Cuantificación de la tipología de coberturas en superficies horizontales de los casos de estudio

Gráfico	Descripción de coberturas	CASO N°1		CASO N°2	
		Área (m2)	%	Área (m2)	%
asfn	 Asfalto: Color Negro	9,334.74	32.89	26,670.85	55.42
asfr	 Asfalto: Color Rojo	-	-	4,184.08	8.69
ch4t	 Cemento hidráulico: Panot "4 tabletas"	3,096.29	10.91	14,813.09	30.78
chflor	 Cemento hidráulico: Panot "La Flor"	1,526.38	5.38	-	-
horgris	 Hormigón: Adoquín color gris	4,126.32	14.54	-	-
horterr	 Hormigón: Adoquín color terracota	162.45	0.57	-	-
horliso	 Hormigón: Loseta	8,240.11	29.03	2,327.30	4.84
gra	 Piedra de granito	93.99	0.33	-	-
are	 Arena	-	-	118.64	0.25
des	 Suelo desnudo o poca vegetación	1,802.33	6.35	14.25	0.03
Total área de propiedad pública		28,382.60	100.00	48,128.21	100.00

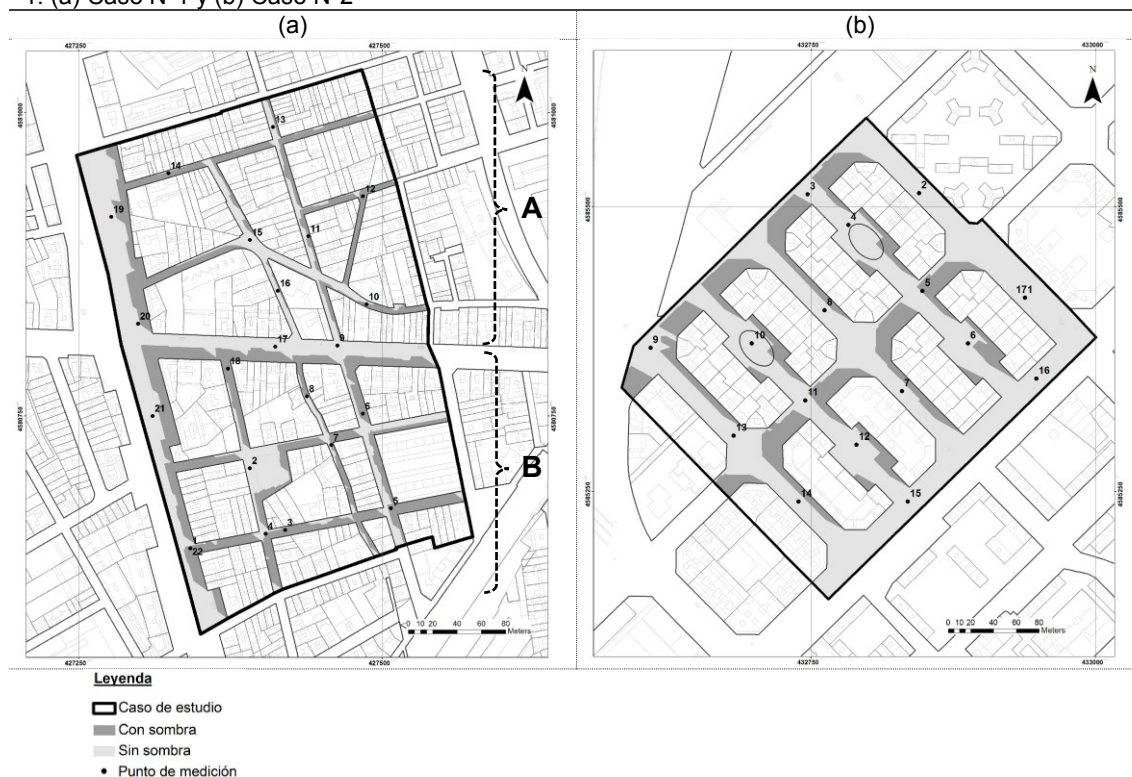
Fuente: Elaboración propia en base a categorización de coberturas de Esparza (2014)

Por otro parte, respecto al análisis de las sombras proyectadas por las edificaciones -no incluye los de árboles- se analizan las arrojadas únicamente en el espacio público para un mes de verano. Realizarlo en tres horas a lo largo de todo el día -el primero después del amanecer, el segundo en el pico más alto de radiación solar y antes del anochecer-, es el marco para comprender la variación de las temperaturas de superficie de las distintas tipologías de coberturas en el espacio público de los dos casos.

Es cierto que los rangos horarios en promedio tienen una duración de 1 hora y 30 minutos, y que se formaría sombras con diferentes ángulos de inclinación en ese transcurso, por lo que para esta investigación se considera las sombras arrojadas en un tiempo determinado y exacto, que implique tanto hora como minuto, del siguiente modo: calcular la media del tiempo de que dure cada rango horario; información que se ingresa al comando “Sombras” del Sketch Up. Para el estudio de las sombras, es necesario aclarar dos temas: primero, se compara los dos casos de estudio según cada rango horario, pero la información del primer caso es del 24/07/2019 y del segundo caso, del 25/07/2019; y segundo, en el primer caso se observa dos sectores que se diferencian por el ancho de calles y alturas de edificios, por lo que se distinguen de esta manera: “A” ubicado al norte de Carrer de Sants y “B” ubicado al sur de Carrer de Sants-. (figura 48,a)

Por lo tanto, para el primer rango horario (figura 48), se observa sombras arrojadas en una orientación promedio de 148° SE-NO; éstas se localizan al sur de los ejes viales con orientación este-oeste y al este de los ejes viales con orientación norte-sur. La superficie bajo sombreado alcanza el 47% en el primer caso respecto a un 25%, del segundo caso (tabla 14). Esto se puede comprobar con el primer tipo de eje vial ,que predomina de modo similar en ambos casos, las sombras ocupan casi el 80%³² del primer caso -con ancho promedio de calles secundarias: sector “A” de 6.25m y sector “B” de 7.85m - y el 45% en el segundo caso -con ancho promedio de calles de 20.68m.

Figura 48: Superficie con sombras proyectadas por edificaciones de los casos de estudio - rango horario 1: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con información del Ayuntamiento de Barcelona e Instituto Geográfico Nacional (IGN)

En el segundo rango horario (figura 49), se observa sombras arrojadas en una orientación promedio de 88° SO-NE; éstas se localizan al sur de los ejes viales con orientación este-oeste, predominando en el primer caso, mientras al oeste de los ejes viales con orientación

³² Para el cálculo de este porcentaje, no se considera Carrer de Sants, debido que las calles secundarias son las más predominantes.

norte-sur, en el segundo caso. La superficie bajo sombreadamiento es similar en ambos casos, alcanzando el 30% en el primer caso respecto a un 23%, del segundo (tabla 16).

Figura 49: Superficie con sombras proyectadas por edificaciones de los casos de estudio - rango horario 2: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con información del Ayuntamiento de Barcelona e Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Figura 50: Superficie con sombras proyectadas por edificaciones de los casos de estudio - rango horario 3: (a) Caso N°1 y (b) Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con información del Ayuntamiento de Barcelona e Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Para el segundo rango horario (figura 50), se observa sombras arrojadas en una orientación promedio de 353° SO-NE; éstas se localizan al norte de los ejes viales con orientación este-oeste y al oeste de los ejes viales con orientación norte-sur. La superficie bajo sombreado es muy marcado en ambos casos, no obstante, el segundo caso alcanza 71% comparado a un 49% del primer caso (tabla 16).

Tras la revisión de las sombras en tres tiempos de un día, se observa que las proyecciones en área varían en los dos casos de estudio. Esto quiere decir que, en el primer caso, casi la mitad del espacio público está soleada en la mañana y tarde, mientras que, en el segundo caso de estudio, la cuarta parte está soleada en la mañana -rango horario 1- y, en esa misma proporción, sombreada en la tarde -rango horario 3-.

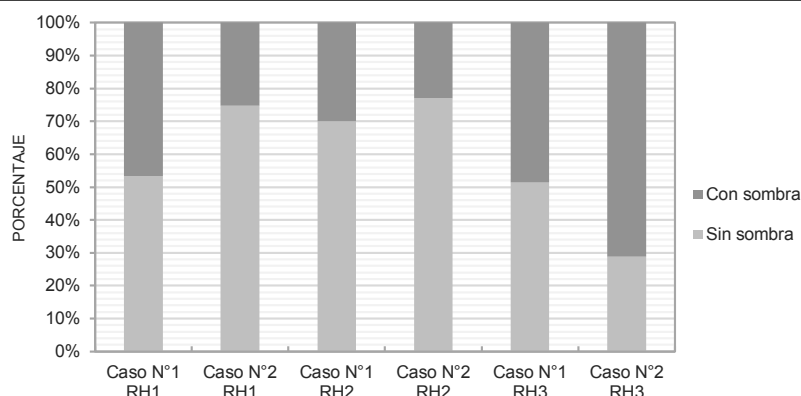
Sin embargo, durante la hora central del día -rango horario 2- ambos tienen similar área soleada alcanzado la cuarta parte del espacio público -77% para el primer caso y 70% para el segundo.

Tabla 16: Cuantificación de áreas soleadas y sombreadas de los casos de estudio

Descripción		CASO N°1		CASO N°2	
		Área (m2)	%	Área (m2)	%
RANGO HORARIO 1					
ss_rh1	Sin sombra	15,137.33	53.33	35,995.47	74.79
cs_rh1	Con sombra	13,245.27	46.67	12,132.74	25.21
RANGO HORARIO 2					
ss_rh2	Sin sombra	19,868.13	70.00	37,051.92	76.99
cs_rh2	Con sombra	8,514.47	30.00	11,076.29	23.01
RANGO HORARIO 3					
ss_rh3	Sin sombra	14,599.15	51.44	13,834.70	28.75
cs_rh3	Con sombra	13,783.45	48.56	34,293.53	71.25

Fuente: Elaboración propia

Figura 51: Variación porcentual de áreas soleadas y sombreadas de los casos de estudio



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, al haber establecido la ubicación y generado la tipología de coberturas (tabla 15) como de superficies bajo efectos de sol y sombra en tres rangos horarios durante el día en el espacio público de los casos de estudio (tabla 16), es posible cuantificar el área ocupada de cada tipología de cobertura respecto a estos efectos -sol y sombra- para los mismos rangos horarios establecidos.

En el rango horario 1, las coberturas soleadas con mayor superficie y con cifras muy similares son la loseta de hormigón (20.52%) y asfalto color negro (17.84%) para el primer

caso, mientras es el asfalto color negro que tiene mayor predominancia con 44.26% y luego el panot “4 tabletas” de cemento hidráulico (17.89%) para el segundo caso; por otra parte, las demás coberturas no superan el 5.50% de superficies soleadas. Al mismo tiempo, y en el mismo rango horario, el asfalto color negro alcanza el 15.05% de superficie más sombreada, luego el adoquín color gris (11.21%) y en panot “4 tabletas” de cemento hidráulico y la loseta de hormigón que no superan el 9%, para el primer caso; en cambio, el panot “4 tabletas” de cemento hidráulico solo comprende el 12.89%, cifra semejante al del asfalto color negro (11.15%).

Tabla 17: Cuantificación de tipología de coberturas en superficies horizontales - Rango horario 1

Descripción de coberturas		CASO N°1		CASO N°2	
		Área (m2)	%	Área (m2)	%
COBERTURAS SIN SOMBRA		15,137.33	53.33	35,995.47	74.79
ss_rh1_asfn	Asfalto: Color Negro	5,062.35	17.84	21,302.28	44.26
ss_rh1_asfr	Asfalto: Color Rojo	-	-	3,956.68	8.22
ss_rh1_ch4t	Cemento hidráulico: Panot “4 tabletas”	694.60	2.45	8,609.81	17.89
ss_rh1_chflor	Cemento hidráulico: Panot “La Flor”	852.64	3.00	-	-
ss_rh1_horggris	Hormigón: Adoquín color gris	943.69	3.32	-	-
ss_rh1_horterr	Hormigón: Adoquín color terracota	118.77	0.42	-	-
ss_rh1_horlisa	Hormigón: Loseta	5,823.77	20.52	-	-
ss_r11_gran	Piedra de granito	80.08	0.28	1,993.82	4.14
ss_rh11_are	Arena	-	-	-	-
ss_rh1_des	Suelo desnudo o con poca vegetación	1,561.44	5.50	118.64	0.25
COBERTURAS CON SOMBRA		13,245.27	46.67	35,995.47	25.21
cs_rh1_asfn	Asfalto: Color Negro	4,272.38	15.05	5368.58	11.15
cs_rh1_asfr	Asfalto: Color Rojo	-	-	227.41	0.47
cs_rh1_ch4t	Cemento hidráulico: Panot “4 tabletas”	2,401.69	8.46	6,203.28	12.89
cs_rh1_chflor	Cemento hidráulico: Panot “La Flor”	673.74	2.37	-	-
cs_rh1_horggris	Hormigón: Adoquín color gris	3,182.63	11.21	-	-
cs_rh1_horterr	Hormigón: Adoquín color terracota	43.68	0.15	-	-
cs_rh1_horlisa	Hormigón: Loseta	2,416.34	8.51	333.48	0.69
cs_rh1_gran	Piedra de granito	13.91	0.05	-	-
cs_rh1_are	Arena	-	-	-	-
cs_rh1_des	Suelo desnudo o con poca vegetación	240.89	0.85	-	-

Fuente: Elaboración propia

En el rango horario 2 (tabla 18), las coberturas soleadas con mayor superficie son muy similares al rango horario 1, y son el asfalto color negro (23.28%) y la loseta de hormigón (20.03%) para el primer caso, mientras es el asfalto color negro que tiene mayor predominancia con 45.45% y luego la loseta de hormigón (19.41%) para el segundo caso; por otra parte, las demás coberturas no superan el 9% de superficies soleadas.

Al mismo tiempo, y en el mismo rango horario, las coberturas no superan el 12% de superficies sombreadas, el asfalto color negro y la loseta de hormigón alcanzan 9.61% y 9.00% respectivamente para el primer caso, y el panot “4 tabletas” de cemento hidráulico y el asfalto de color negro, 11.36% y 9.97% respectivamente para el segundo caso.

En el rango horario 3 (tabla 19), las coberturas soleadas con mayor superficie se encuentran en el primer caso, siendo el asfalto color negro (19.98%) y la loseta de hormigón (16.47%), mientras en el segundo caso, también lo es sólo el asfalto color negro (15.85%). Caso contrario sucede en las superficies sombreadas, debido que el segundo caso concentra 39.56% y 22.65%, de asfalto color negro y panot “4 tabletas” de cemento hidráulico

respectivamente, respecto al primer caso, con 13.10%, 12.91%, 12.56% de adoquín color gris, asfalto color negro y loseta de hormigón respectivamente.

Tabla 18: Cuantificación de tipología de coberturas en superficies horizontales - Rango horario 2

Descripción de coberturas		CASO N°1		CASO N°2	
		Área (m2)	%	Área (m2)	%
COBERTURAS SIN SOMBRA		19,868.13	70.00	37,051.92	76.99
ss_rh2_asfn	Asfalto: Color Negro	6,606.53	23.28	21,874.66	45.45
ss_rh2_asfr	Asfalto: Color Rojo	-	-	3,378.97	7.02
ss_rh2_ch4t	Cemento hidráulico: Panot "4 tabletas"	2,524.18	8.89	9,343.47	19.41
ss_rh2_chflor	Cemento hidráulico: Panot "La Flor"	900.98	3.17	-	-
ss_rh2_horgris	Hormigón: Adoquín color gris	2,242.15	7.90	-	-
ss_rh2_horterr	Hormigón: Adoquín color terracota	85.79	0.30	-	-
ss_rh2_horlisa	Hormigón: Loseta	5,685.91	20.03	2,321.93	4.82
ss_rh2_gran	Piedra de granito	93.99	0.33	-	-
ss_rh2_are	Arena	-	-	118.64	0.25
ss_rh2_des	Suelo desnudo o con poca vegetación	1728.60	6.09	14.25	0.03
COBERTURAS CON SOMBRA		8,514.47	30.00	11,076.29	23.01
cs_rh2_asfn	Asfalto: Color Negro	2,728.20	9.61	4,796.19	9.97
cs_rh2_asfr	Asfalto: Color Rojo	-	-	805.11	1.67
cs_rh2_ch4t	Cemento hidráulico: Panot "4 tabletas"	572.11	2.02	5,469.62	11.36
cs_rh2_chflor	Cemento hidráulico: Panot "La Flor"	625.40	2.20	-	-
cs_rh2_horgris	Hormigón: Adoquín color gris	1,884.17	6.64	-	-
cs_rh2_horterr	Hormigón: Adoquín color terracota	76.66	0.27	-	-
cs_rh2_horlisa	Hormigón: Loseta	2,554.20	9.00	5.37	5.37
cs_rh2_gran	Piedra de granito	-	-	-	-
cs_rh2_are	Arena	-	-	-	-
cs_rh2_des	Suelo desnudo o con poca vegetación	73.73	0.26	-	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Cuantificación de tipología de coberturas en superficies horizontales - Rango horario 3

Descripción de coberturas		CASO N°1		CASO N°2	
		Área (m2)	%	Área (m2)	%
COBERTURAS SIN SOMBRA		14,599.15	51.44	13,834.68	28.75
ss_rh3_asfn	Asfalto: Color Negro	5,671.41	19.98	7,629.87	15.85
ss_rh3_asfr	Asfalto: Color Rojo	-	-	550.27	1.14
ss_rh3_ch4t	Cemento hidráulico: Panot "4 tabletas"	2,313.05	8.15	3,911.97	8.13
ss_rh3_chflor	Cemento hidráulico: Panot "La Flor"	199.45	0.70	-	-
ss_rh3_horgris	Hormigón: Adoquín color gris	408.85	1.44	-	-
ss_rh3_horterr	Hormigón: Adoquín color terracota	22.78	0.08	-	-
ss_rh3_horlisa	Hormigón: Loseta	4,673.87	16.47	1,742.57	3.62
ss_rh3_gran	Piedra de granito	93.99	0.33	-	-
ss_rh3_are	Arena	-	-	-	-
ss_rh3_des	Suelo desnudo o con poca vegetación	1,215.75	4.28	-	-
COBERTURAS CON SOMBRA		13,783.45	48.56	34,293.53	71.25
cs_rh3_asfn	Asfalto: Color Negro	3,663.32	12.91	19,040.98	39.56
cs_rh3_asfr	Asfalto: Color Rojo	-	-	3,633.81	7.55
cs_rh3_ch4t	Cemento hidráulico: Panot "4 tabletas"	783.24	2.76	10,901.12	22.65
cs_rh3_chflor	Cemento hidráulico: Panot "La Flor"	1,326.93	4.68	-	-
cs_rh3_horgris	Hormigón: Adoquín color gris	3,717.47	13.10	-	-
cs_rh3_horterr	Hormigón: Adoquín color terracota	139.67	0.49	-	-
cs_rh3_horlisa	Hormigón: Loseta	3,566.24	12.56	584.73	1.21
cs_rh3_gran	Piedra de granito	-	-	-	-
cs_rh3_are	Arena	-	-	118.64	0.25
cs_rh3_des	Suelo desnudo o con poca vegetación	586.58	2.07	14.25	0.03

Fuente: Elaboración propia

5.2. Modelo de simulación de *LST* y otros indicadores según imagen satelital

En relación al proceso del análisis por teledetección de la imagen satelital de Landsat-8, permite obtener características cuantificadas de la temperatura de superficie (*LST*) diurna, *NDBI*, *IBI*, *BU*, albedo y *LSE*; sin embargo, estas características obtenidas de las imágenes satelitales presentan la variable de arborización, variable que no se considera en esta investigación debido que el propósito de la presente es comprender la magnitud de la influencia de las temperaturas de superficie bajo efectos de sol y sombra- en relación a la morfología urbana- a la isla de calor urbana; por lo tanto, estas características son referentes para el posterior análisis de *LST* diurna registrada según medición en campo.

La distribución de las temperaturas de superficie es heterogénea en los dos casos, en el primer caso se observa menor concentración al oeste -a lo largo del eje de la Rambla de Badal- hasta 38.20°C y va incrementándose hacia el este hasta alcanzar 38.95°C; además, en la primera zona se registra dos puntos de medición con las mínimas temperaturas media de 37.06°C y 37.18°C, punto 2 y 21 respectivamente, donde se halla la mayor concentración de arbolado. Mientras que, en el segundo caso, la mayor parte bordea hasta 36°C, en dos puntos de medición se concentra las máximas temperaturas media de 36.94°C. Entonces, el primer supera en intensidad al segundo en 1.87°C y 2.01°C, con 37.06°C de temperatura de superficie media minina y 38.95°C de temperatura media máxima, respectivamente.

Figura 52: Mapa del *LST* de día - Caso N°1

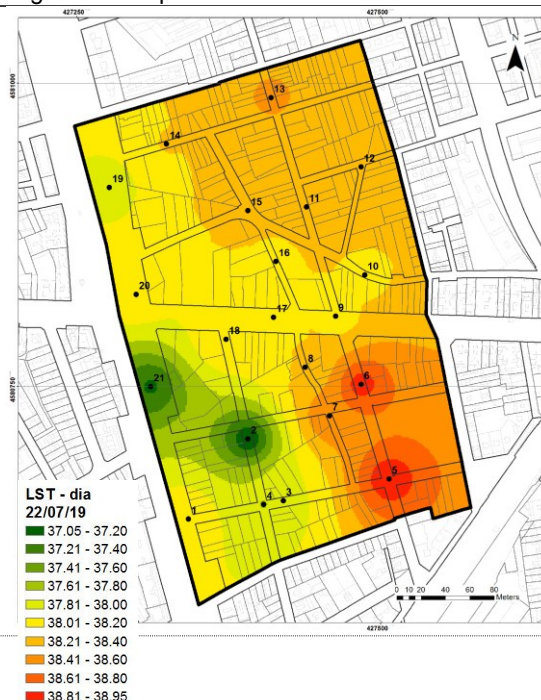
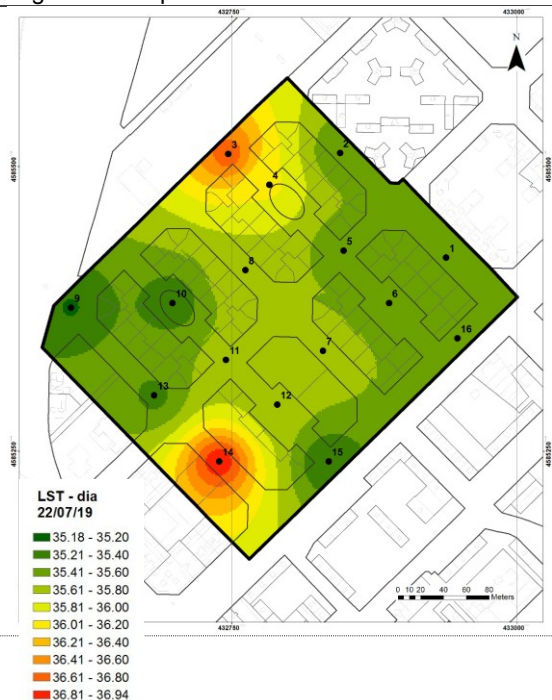


Figura 53: Mapa del *LST* de día - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

Respecto a la intensidad acumulada del terreno, el primer caso presenta un valor máximo superior (0.15) comparado al segundo (0.11), pero el segundo caso presenta un valor mínimo (-0.17) muy inferior al primero (0.00). La mayor intensidad se concentra al noreste en diversos puntos de medición ubicados en la zona edificada, mientras que los menores valores se ubican hacia el oeste, la zona más abierta con arborización ubicada a lo largo de la Rambla de Badal y el huerto. En el segundo caso, los más intensos se ubican en el eje vial central con orientación norte sur y en el punto de medición 14, mientras que, en 3 de las 4 plazas, junto a los puntos 9 y 15.

Figura 54: Mapa de *NDBI* - Caso N°1

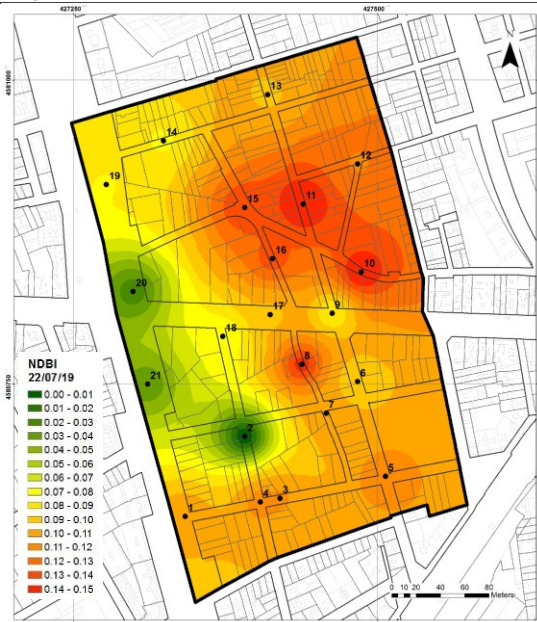
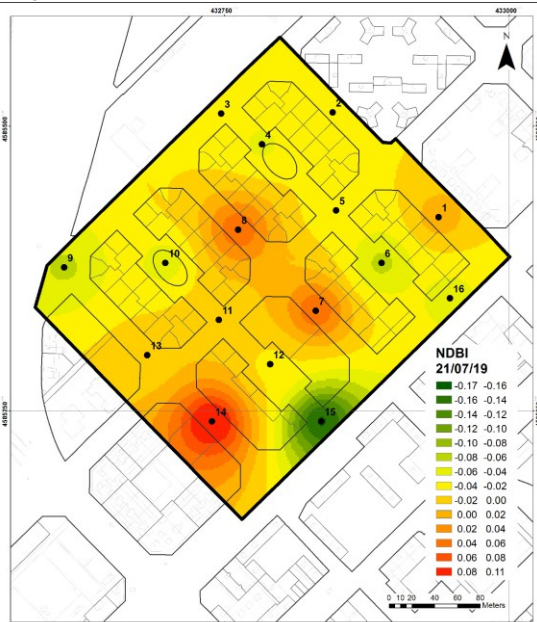


Figura 55: Mapa de *NDBI* - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

La intensidad de características de los terrenos edificados en los dos casos (figura 56 y 57) se distribuyen de manera opuesta, pero el primer caso presenta cierta similitud en distribución al *LST* diurno (figura 52), quiere decir, que presenta una intensidad creciente de oeste a este en el primer caso con tres zonas de menor concentración -en 3 puntos de medición: 2, 19 y 21- y dos zonas de mayor concentración -en 2 puntos de medición: 5 y 16-; mientras sucede todo lo contrario en el segundo, debido que la intensidad se acentúa de este a oeste; alcanzando valores de *IBI* de 0.48 para el primero respecto a 0.41 del segundo.

Figura 56: Mapa de *IBI* - Caso N°1

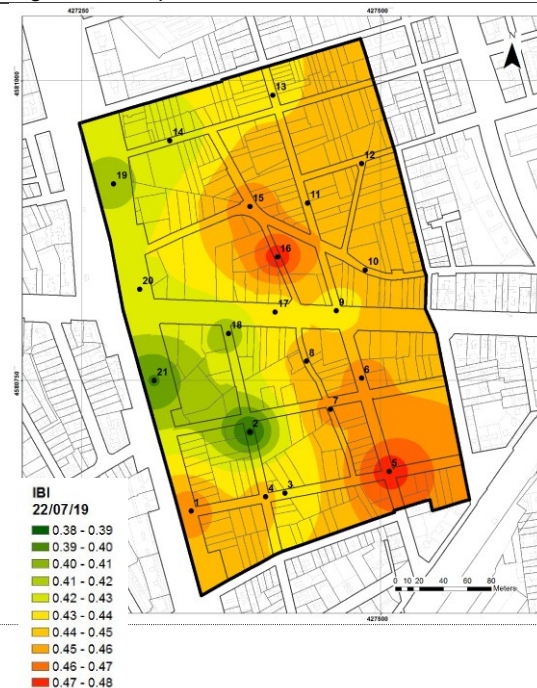
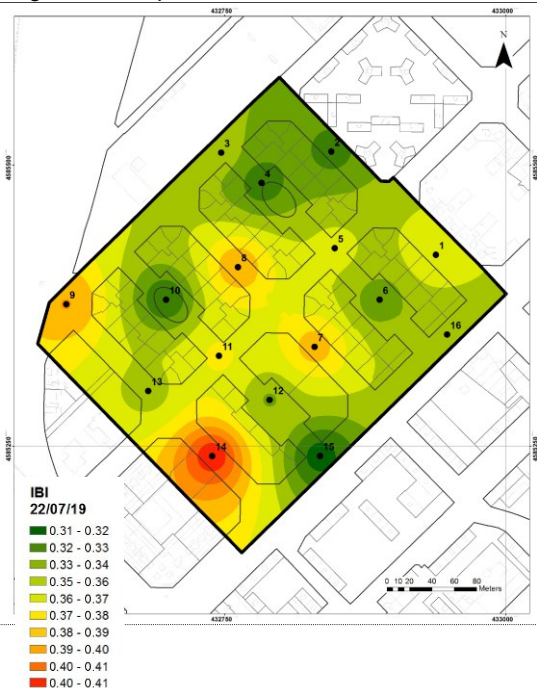


Figura 57: Mapa de *IBI* - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat

Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

La intensidad de las zonas edificadas (figura 58 y 59) se distribuye semejante al del *IBI* en ambos casos, sin embargo, en el primer caso existe mayor intensidad al norte, en los puntos 11, 15 y 16, mientras que, en el segundo, sobre los puntos de medición 5, 7 y 14- y siempre al este, además, los de menor intensidad abarcan la Rambla de Guipúzcoa y las 4 plazas.

Figura 58: Mapa de *BU* - Caso N°1

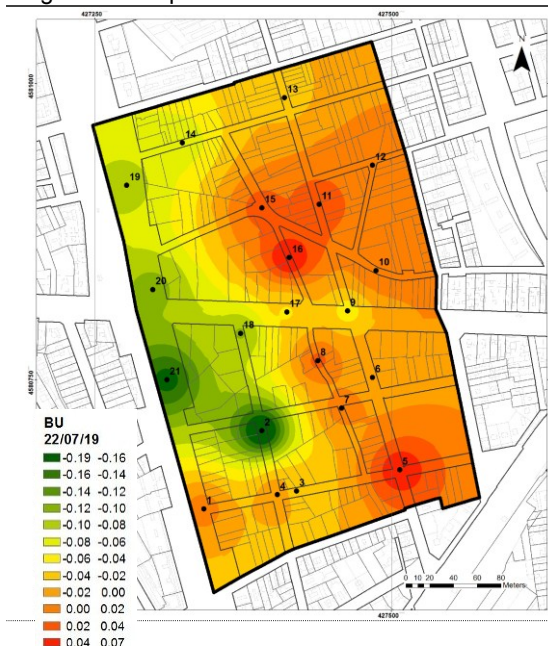
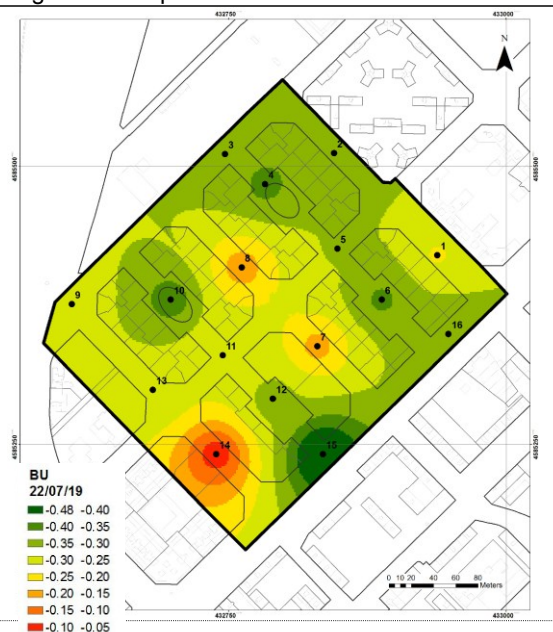


Figura 59: Mapa de *BU* - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

La emisión de calor almacenado por la superficie (figura 60 y 61) presenta un valor de 0.95 a 0.96, no obstante, la distribución de la diferencia mínima de este valor es distinta en los dos casos. En el primer caso la tercera parte de la superficie total bordea el valor de 0.95 y en dos puntos de medición alcanza los 0.96. En el segundo, la tercera parte de la superficie tiene un valor de 0.96 y solo en el punto de medición 14, disminuye al valor de 0.95.

Figura 60: Mapa de *LSE* - Caso N°1

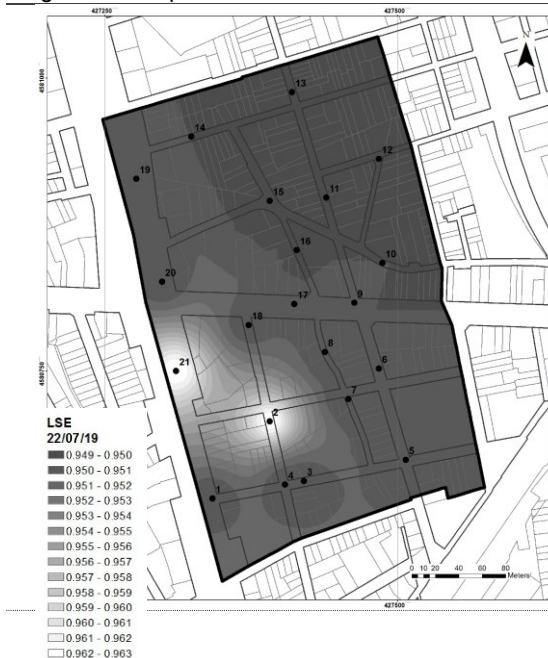
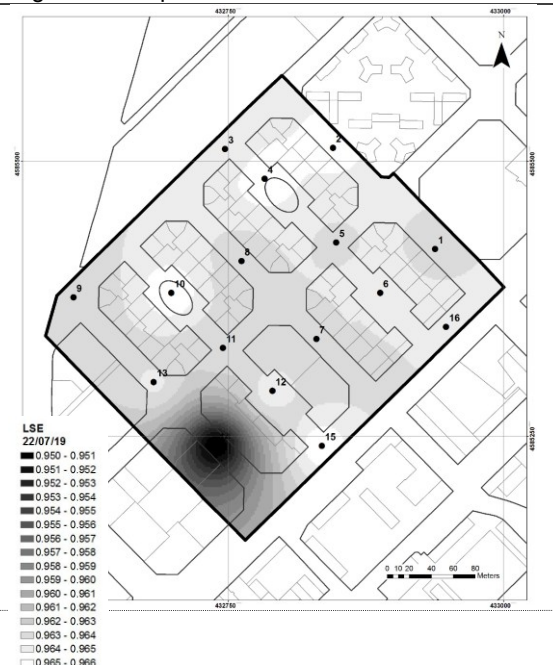


Figura 61: Mapa de *LSE* - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

Fuente: Elaboración propia con imagen de Landsat 8

Por otra parte, el albedo (figura 62 y 63) muestra una distribución contraria a los indicadores previos, en los dos casos de estudio, quiere decir, para el primer caso, 3 puntos de medición ubicados en el eje de la Rambla de Badal y el punto de medición 17, presentan menor reflectividad de sus superficies (18.50%) mientras que en el interior del sector A y B se presentan los más refractivos alcanzando 23.50% (figura 62). De modo similar, en el segundo, se obtiene 23.00% de reflectividad en dos puntos de medición ubicados al centro y la menor al sur.

Figura 62: Mapa de albedo - Caso N°1

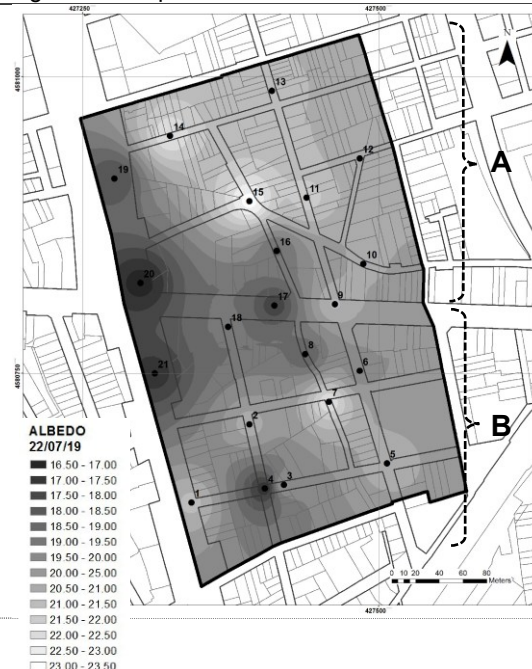


Figura 63: Mapa de albedo - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con información de imágenes de Landsat 8 de 22/07/2019

Fuente: Elaboración propia con información de imágenes de Landsat 8 de 22/07/2019

Para resumir estas características cuantificadas, se establece que la temperatura media superficial de día del primer caso es mayor en 2.48°C respecto al segundo, pero ambos superan los 35°C. Además, los indicadores de urbanización presentan mayor intensidad en el primer caso, en otras palabras, la intensidad media acumulada del terreno, la intensidad media de terrenos edificados y la intensidad media de zonas edificadas alcanzan valores superiores al segundo caso con 0.10, 0.44, -0.03, respectivamente, considerando +1 el máximo valor, (tabla 20). Respecto al porcentaje medio del albedo y valor medio de la emisividad, los valores de ambos en casos son muy similares, para el primer indicador sólo se diferencia en 0.86%, considerando un rango de 19% a 20%, mientras para el segundo índice varían entre 0.95 a 0.96.

Tabla 20: Comparación de los indicadores según imagen satelital de los casos de estudio

Indicadores	CASO N°1			CASO N°2		
	Media Mín.	Media Máx.	Promedio	Media Mín.	Media Máx.	Promedio
LST- día	37.06	38.94	38.15	35.19	36.93	35.67
NDBI	0.00	0.15	0.10	-0.16	0.11	-0.02
IBI	0.39	0.48	0.44	0.32	0.41	0.35
BU	-0.20	0.06	-0.03	-0.48	-0.07	-0.29
ALBEDO	16.73%	23.19%	19.95%	16.55%	22.94%	20.81%
LSE	0.9500	0.9630	0.9512	0.9500	0.9660	0.9635

Fuente: Elaboración propia con información de imágenes de Landsat-8 de 22/07/2019

5.3. Modelo de simulación de *LSAT* y otras variables climáticas según mediciones en campo

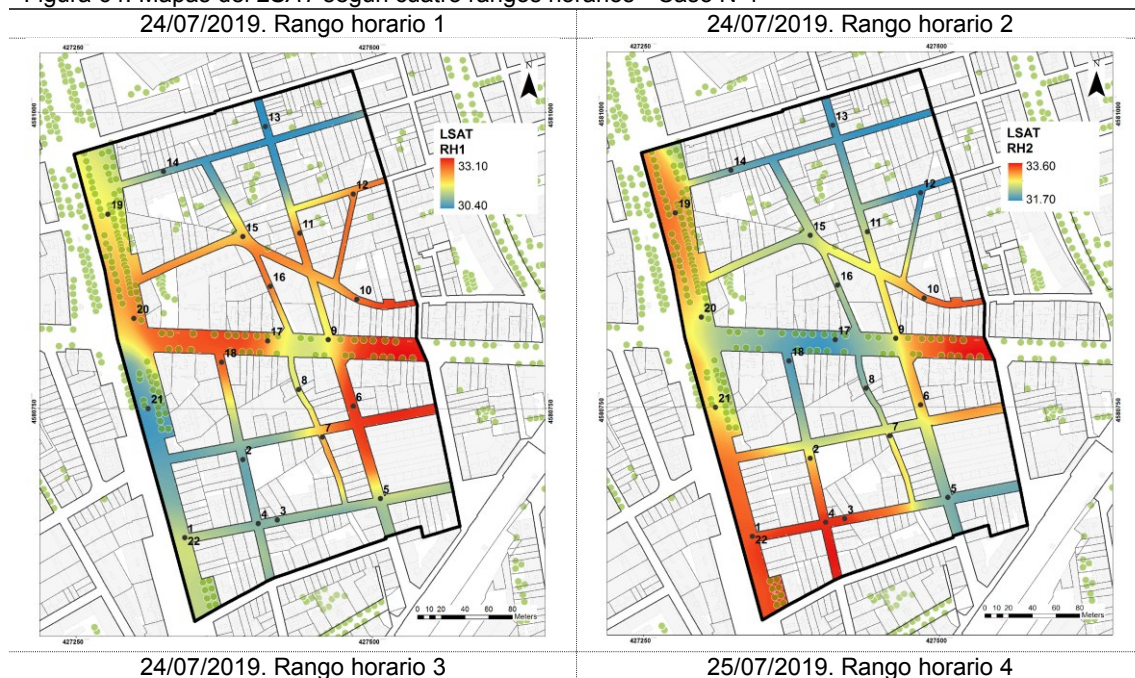
Para el análisis de los modelos, primero se presenta mapas de los 4 rangos horarios de los casos de estudio según cada variable climática -temperatura de aire, humedad relativa y velocidad de viento- de manera desglosada; posterior a ello, mediante gráficos de líneas se muestra la comparación de la información tomada en campo respecto al registrado por una estación privada y dos públicas. Finalmente, se calcula y realiza un comparativo de la media de cada variable (tanto de día y noche) según las fuentes de información seleccionadas.

▪ Temperatura de aire – *LSAT*

En el primer caso (figura 64), tras unas horas luego del amanecer, la zona que concentra mayor temperatura máxima de aire se sitúa al centro con 33.10°C -en los puntos de medición 6 y 18- y luego disminuye en 2.7°C hacia el noreste y suroeste, alcanzando en ambos los 30.40°C . Un par de horas después, se observa un incremento en las temperaturas de aire tanto en la máxima como en la mínima, la máxima se incrementa en 0.50°C (33.60°C) respecto al de la mañana, ubicado al suroeste -en los puntos de medición 1, 3 y 4- y al noroeste -en el punto de medición 19- sobre el eje de la Rambla de Badal; mientras que el resto de la superficie amplía su temperatura hasta 31.70°C , de forma homogénea.

Por la tarde, la temperatura de aire disminuye y se mantiene sobre los 29.50°C en casi toda la superficie, pero obtiene 30.60°C en el centro hacia el este -en los puntos de medición 6 al 10-. Por la noche este descenso continúa hasta los 27.10°C también sobre toda la superficie, sin embargo, el centro aún concentra las temperaturas elevadas, pero en menor proporción, de 28.10°C .

Figura 64: Mapas del *LSAT* según cuatro rangos horarios - Caso N°1





Fuente: Elaboración propia con información registrada en campo en 24/07/19 y 25/07/19

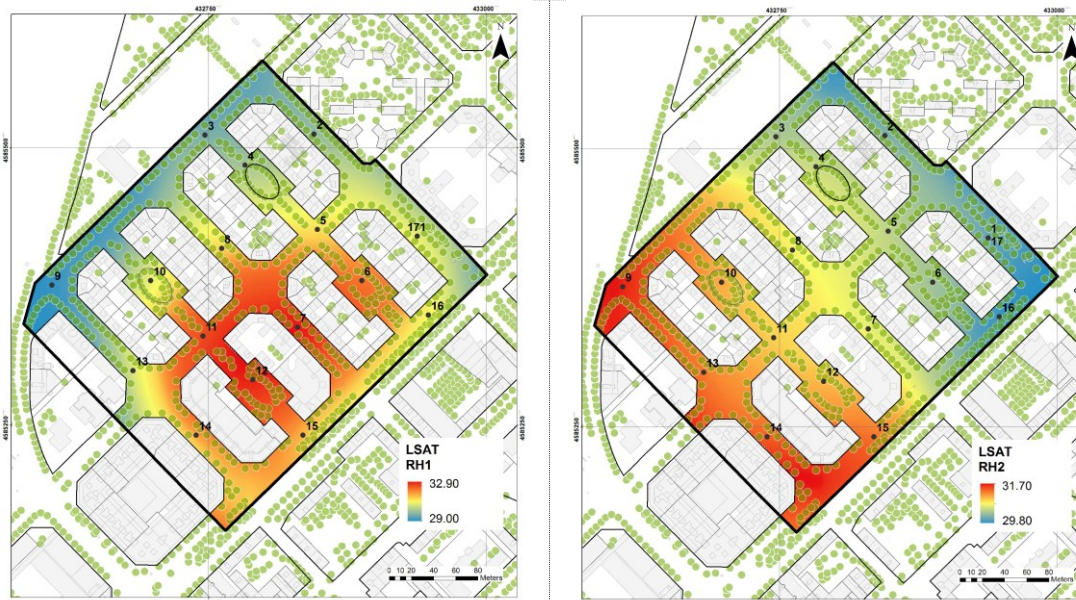
Por su parte, el segundo caso (figura 65) presenta por la mañana temperaturas de aire de 29°C a 30°C en su perímetro norte y este, pero se observa mayor intensidad en el centro hacia el sur -sobre los puntos de medición 6, 7 11 y 12-, siendo el 6 y 12 los que se ubican en plazas, y alcanzan entre 31°C a 32.90°C. Tras unas horas, la intensidad concentrada en el centro se traslada hacia el oeste -desde los puntos de medición 10 y 12 hacia el 9 y 14- pero se mantiene sobre los 31°C, mientras que el este sobre los 29.8°C a 30°C.

Por la tarde, la intensidad máxima de temperatura de aire se traslada nuevamente, pero hacia el norte -con un ligero descenso respecto a la anteriores horas- sobre los 30°C, mientras que la mínima se encuentra en el sur -sobre el eje de Rambla de Guipúzcoa- con 29°C, relacionado posiblemente a la proyección de las sombras en esta misma hora (figura 41, a). Durante la noche, la temperatura de aire es se mantiene entre 27°C a 28°C, pero la mayor concentración se ubica sobre el suroeste con 28°C y el resto de superficie con 27°C, además que la distribución de la mayor concentración es similar al generado en la mañana.

Figura 65: Mapas del LSAT según cuatro rangos horarios - Caso N°2

25/07/2019. Rango horario 1

25/07/2019. Rango horario 2





Fuente: Elaboración propia con información registrada en campo en 25/07/19 y 26/07/19

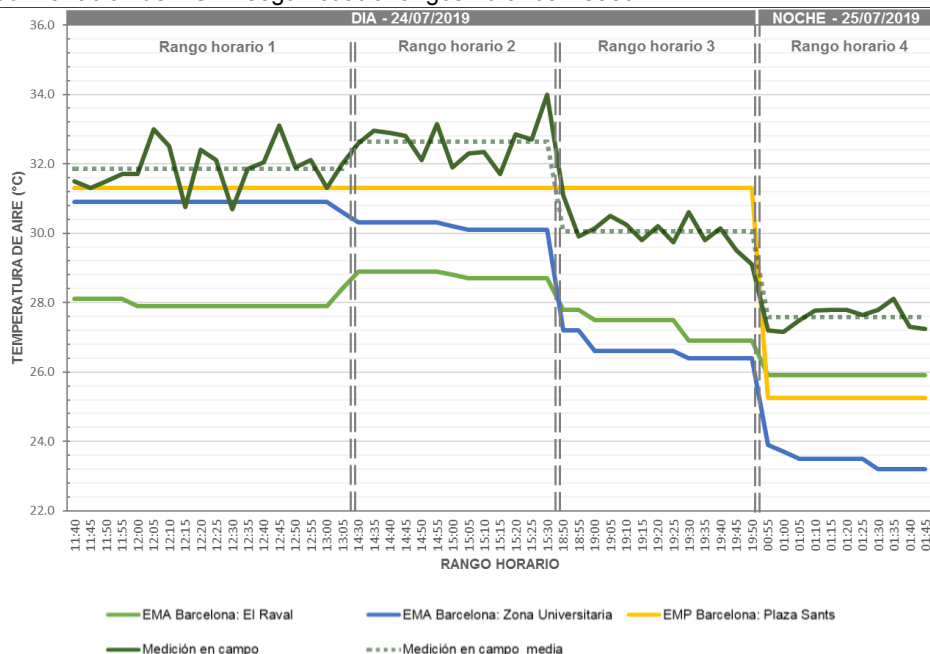
Mediante los siguientes gráficos se analiza los datos de la temperatura de aire, por lo tanto, las líneas reflejan la variación de los éstos datos a lo largo del día según distintas fuentes de información. En el primer caso (figura 65) se muestra que los datos de las estaciones públicas - Zona Universitaria y El Raval- se encuentran muy por debajo de la media de la campaña de medición en campo, aproximándose en los dos primeros rangos horarios la primera estación pública (30.9°C y 30.1°C), pero en los dos últimos rangos horarios lo hace la segunda estación pública (27.2°C y 23.9°C).

Respecto a la estación privada, se observa que la media de día (31.3°C) -en los tres primeros rangos- es la más cercana las registradas en campo (31.9°C, 32.6°C y 30.1°C), no obstante, la media de noche (25.3°C), se aleja y desciende hasta por debajo de la estación publica El Raval (25.9°C). Por otro lado, las temperaturas máxima y mínima de las registradas en campo se diferencian en 6.8°C, alcanzando 34°C a las 15:30 horas del 24/07/2019 y 27.2°C a la 01:00 horas del 25/07/2019, respectivamente.

En el segundo caso (figura 66) se muestra que los datos generados por las estaciones públicas -Zoo y El Raval- y la privada -Petevé- se encuentran relativamente por debajo de la media de la campaña de medición en campo, sin embargo, la primera estación publica se aproxima al rango horario 1 y 2 (29.4°C y 29.7°C), pero en los dos últimos rangos horarios lo hace la segunda estación pública (27.8°C y 26.6°C).

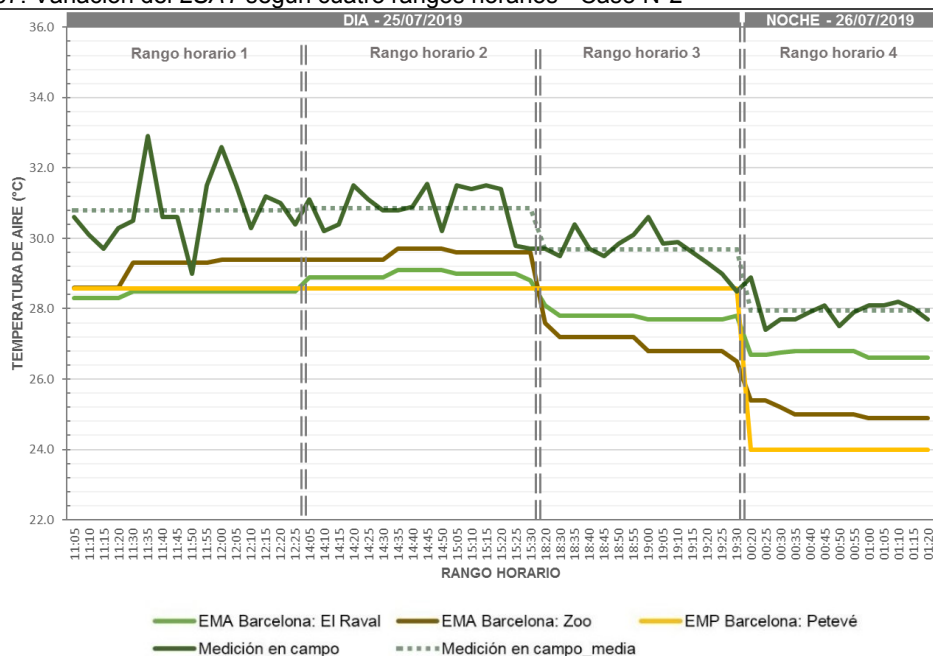
Respecto a la estación privada, se observa que la media de día (28.6°C) -en los tres primeros rangos- se ubica entre la variación de temperaturas registradas por las estaciones públicas, no obstante, la media de noche (24.0°C), se aleja de los registros de todas las fuentes. Por otro lado, las temperaturas máxima y mínima de las registradas en campo se diferencian en 5.5°C, alcanzando 32.9°C y 27.4°C, respectivamente

Figura 66: Variación del LSAT según cuatro rangos horarios - Caso N°1



Fuente: Elaboración propia con información de Meteocat, Meteoclimatic y registro en campo en 24/07/19 y 25/07/19

Figura 67: Variación del LSAT según cuatro rangos horarios - Caso N°2



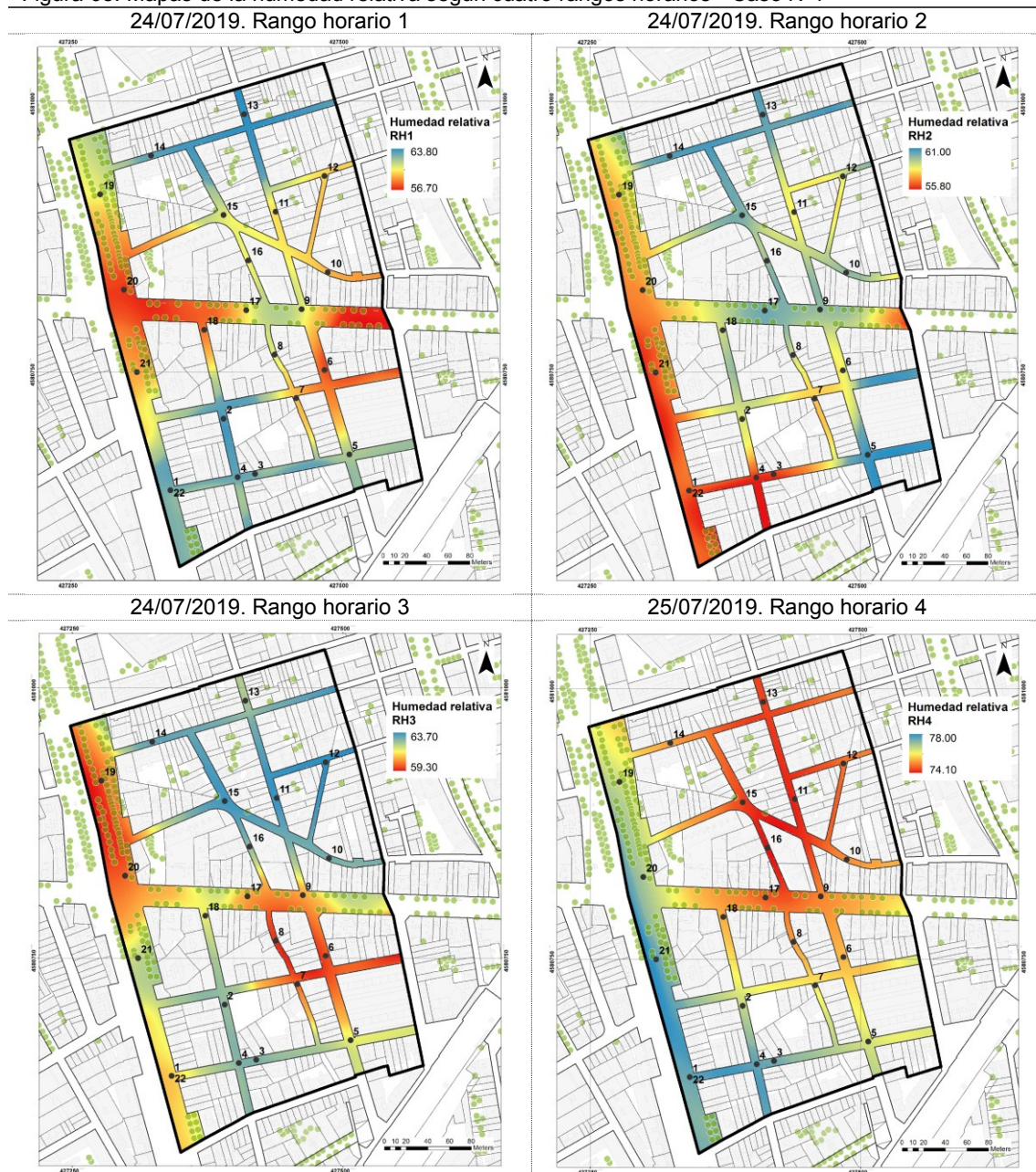
Fuente: Elaboración propia con información de Meteocat, Meteoclimatic y registro en campo en 25/07/19 y 26/07/19

▪ Humedad relativa

En el primer caso (figura 68), transcurrido unas horas desde el amanecer, se concentra mayor humedad en dos zonas, al norte - en los puntos de medición 13 y 14- y al suroeste - en los puntos 1 al 4- entre 62% a 63%, mientras que el resto de superficie obtiene de 56 a 61%, siendo la mínima en el punto de medición 20 - intersección Rambla de Badal y Carrer de Sants-. Un par de horas después, la humedad disminuye y sus máximos porcentajes (60% a 61%) se ubican también al norte y en el sureste, ambos en vías secundarias. Los mínimos porcentajes se acentúan en la Rambla de Badal con 55% a 58%.

Por la tarde, la humedad se intensifica al norte sobre las vías secundarias con 61% a 64%, mientras que en el centro -en los puntos de medición 6 al 8- y al noroeste de Rambla de Badal disminuye notablemente hasta 59% de intensidad. Finalmente, por la noche la humedad alcanza 77% a 78% a lo largo de la Rambla de Badal y al suroeste - en los puntos 3 y 4-, por otra parte, la menor intensidad se registra al norte y se acentúa hasta 74%.

Figura 68: Mapas de la humedad relativa según cuatro rangos horarios - Caso N°1



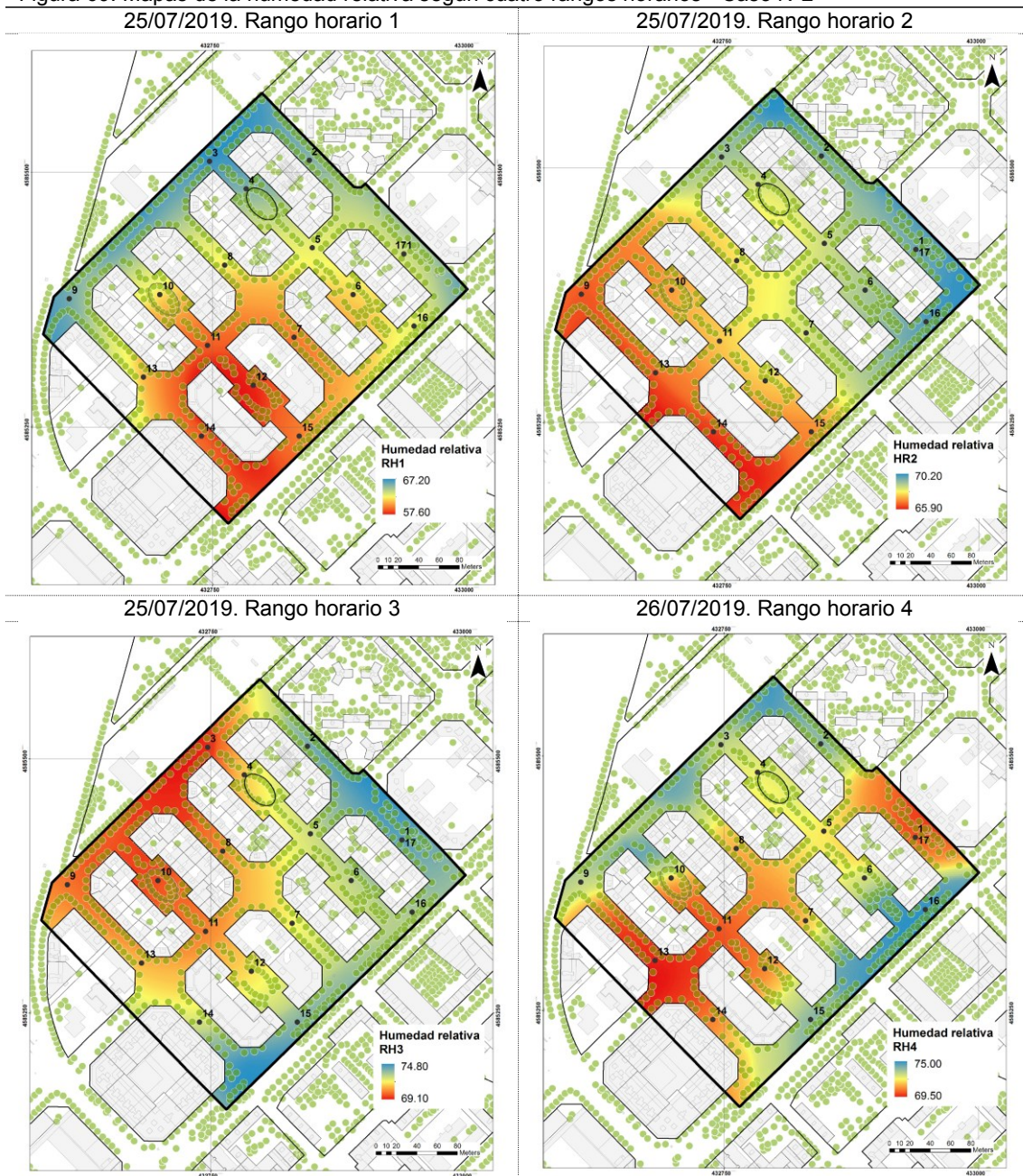
Fuente: Elaboración propia con información registrada en campo en 24/07/19 y 25/07/19

Por su parte, el segundo caso (figura 69), por la mañana presenta mayor intensidad de humedad respecto al primer caso (figura 68), habiendo transcurrido unas horas luego del amanecer, las zonas que concentra mayor humedad son: al norte -en los puntos de medición 3, 4 y 9- y al noreste entre 65% a 67%, y va decreciendo hacia resto en dirección sur obteniendo de 57% a 64%, siendo la mínima la ubicada en una de las plazas -en el punto de medición 12-.

Un par de horas después, se observa un desplazamiento de la mayor concentración hacia el este y sobre los puntos de medición 1, 2 y 16, alcanzando 70%; mientras hacia el sur se sitúa los menores registros de humedad de 65% a 66%.

Por la tarde, la humedad se intensifica en el este y sur, relacionado posiblemente a la proyección de las sombras en este mismo horario (figura 50, b), y alcanza de 72% a 74% mientras al noroeste disminuye hasta 69%. Finalmente, por la noche la intensidad máxima solo aumenta 1% y obtiene 75% pero su distribución se diferencia en dos zonas: el primero desde el norte decreciendo hacia el sur - en los puntos de medición 4 y 10- y el segundo en el sur decreciendo hacia el norte hacia las plazas -en los puntos de medición 6 y 12-.

Figura 69: Mapas de la humedad relativa según cuatro rangos horarios - Caso N°2



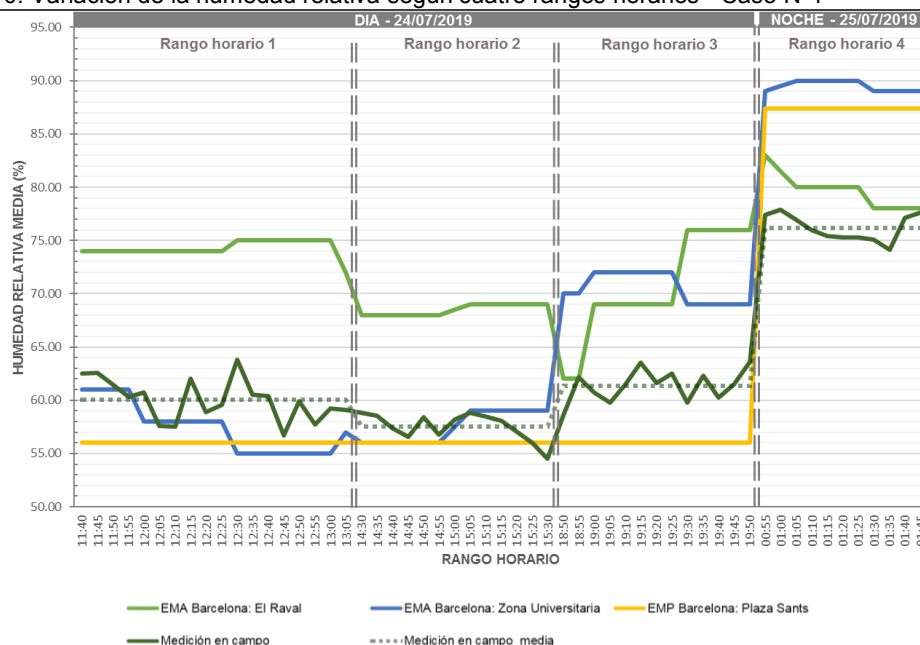
Fuente: Elaboración propia con información registrada en campo en 25/07/19 y 26/07/19

Los siguientes gráficos muestran el análisis comparativo de la humedad y las líneas reflejan la variación de los éstos datos a lo largo del día según distintas fuentes de información.

En el primer caso, durante los dos primeros rangos, existe cierta correlación de los datos de la estación pública Zona Universitaria (humedad máxima con 61.55% entre las 11:40-11:55 horas), la estación privada Plaza Sants (media de 55.99%) y el registrado en campo (humedad máxima con 63.80% a las 12:30 horas); sin embargo, en el tercer rango los datos de la estación privada (media de 55.99%) se aproximan a los registrados en campo (media de 61.38%), mientras que las otras estaciones muestran datos superiores.

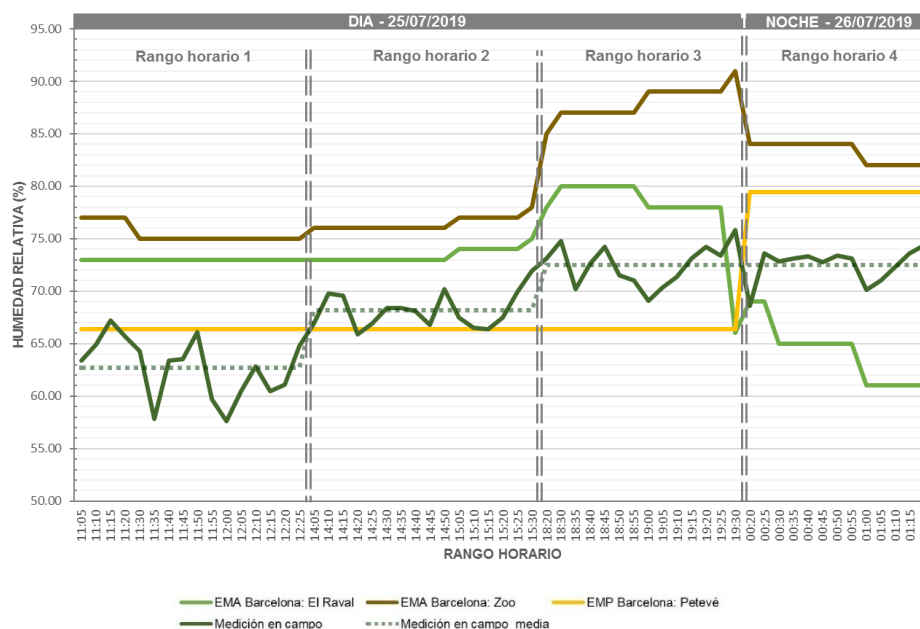
Por la noche, en el último rango horario, los datos del registro en campo muestran porcentajes de humedad inferiores al resto de estaciones; la humedad relativa máxima y mínima registradas en campo se diferencian en 23.40%, alcanzando 77.90% y 54.50%, respectivamente.

Figura 70: Variación de la humedad relativa según cuatro rangos horarios - Caso N°1



Fuente: Elaboración propia con información de Meteocat, Meteoclimatic y registro en campo en 24/07/19 y 25/07/19

Figura 71: Variación de la humedad relativa según cuatro rangos horarios - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con información de Meteocat, Meteoclimatic y registro en campo en 25/07/19 y 26/07/19

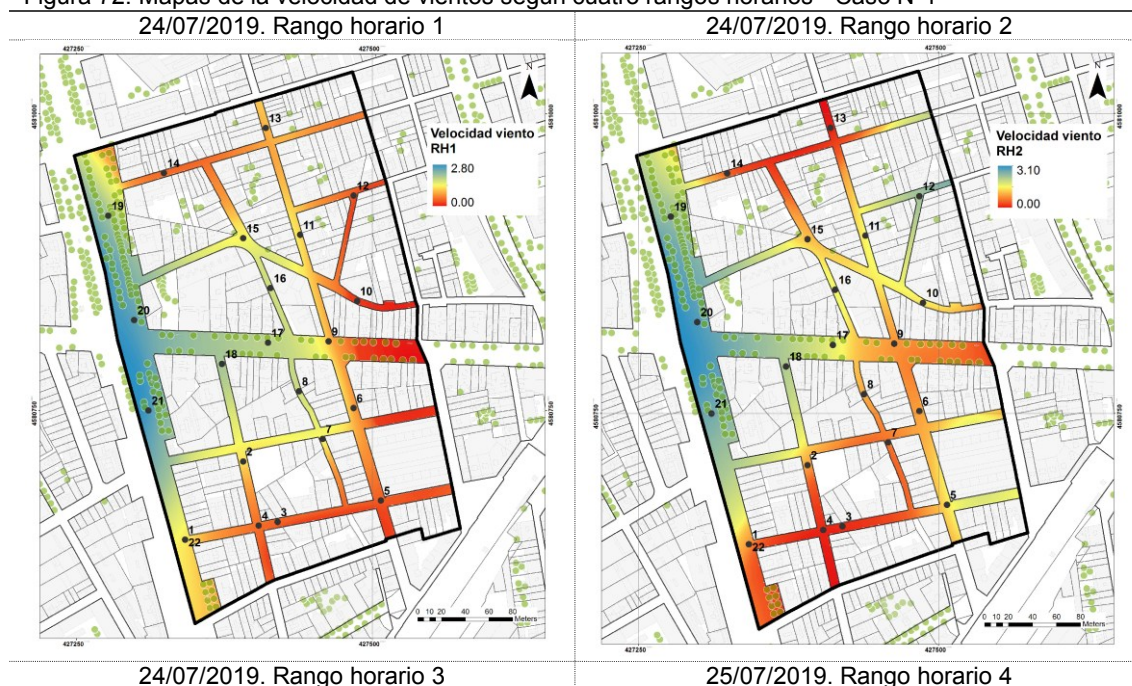
En el segundo caso, durante los tres primeros rangos horarios, se muestra que los datos generados por las estaciones públicas -Zoo y El Raval- muestran un comportamiento de la humedad similar al registrado en campo, alcanzando 91.00% a las 19:30 horas, 80% a las 18:45 horas y 75.80% a las 19:30 horas de humedad relativa máxima, respectivamente. En el cuarto horario, los datos de la estación privada es la más próxima al registrados en campo con una diferencia media de 6.95%. Asimismo, no se observa incremento significativo en la noche respecto a la tarde. Por otro lado, la humedad máxima y mínima de las registradas en campo se diferencian en 18.20%, alcanzando 75.80% y 57.60%, respectivamente.

▪ Velocidad de viento

En el primer caso (figura 72), al haber transcurrido unas horas luego del amanecer, la zona que concentra mayor velocidad de vientos se sitúa en dos vías, principalmente al centro del eje de la Rambla de Badal -registrados en los puntos de medición 19 al 21- y con menor predominancia en el eje de los puntos de medición 8 y 16, superando en ambos casos los 2m/s, mientras que en el resto de superficie sólo alcanzó apenas 1m/s y ningún valor hacia el este -en el punto de medición 10-. Un par de horas después, la velocidad de viento continúa situándose sobre la Rambla de Badal, pero se incrementa hasta 3.10m/s, por otro lado, las menores velocidades se sitúan sobre los puntos de medición 3-4 en el sur y 13-14 en el norte.

Por la tarde, la velocidad máxima registrada disminuye hasta 1.90m/s, pero se sitúa predominantemente en el norte y sureste sobre calles secundarias, por el contrario, en el norte del eje de la Rambla de Badal se registran los valores mínimos. Finalmente, por la noche es notable el descenso de la velocidad máxima de viento que cae hasta 0.70m/s en sólo un punto de medición, mientras en el resto no se obtienen valores significativos.

Figura 72: Mapas de la velocidad de vientos según cuatro rangos horarios - Caso N°1





Fuente: Elaboración propia con información registrada en campo en 24/07/19 y 25/07/19

Por su parte, el segundo caso (figura 73), por la mañana presenta mayor velocidad de vientos respecto al primer caso (figura 72) alcanzando 3.80m/s a lo largo del eje de la Rambla de Guipúzcoa y 2.3m/s al noroeste -en el punto de medición 9-; mientras que las mínimas se registran al norte -puntos de medición 2 al 4-. Un par de horas después, la velocidad de viento se mantiene, similar al de la mañana, con un incremento poco significativo -de 0.1m/s-, ubicado aún en la Rambla de Badal en dirección al noreste; por el contrario, las mínimas se sitúan hacia el oeste y sobre dos plazas específicamente ubicadas en los puntos de medición 4 y 12.

Por la tarde, se observa un incremento notable de la velocidad y éste alcanza los 4.30m/s ubicado en dos zonas, al norte y al este -en parte del eje de la Rambla de Badal-, mientras que las mínimas continúan acentuándose en el oeste y suroeste. Finalmente, por la noche sólo se registra en sólo un punto de medición -en el 13- con velocidad de viento de 0.60m/s, este es muy contrario al resto debido que no alcanzaron ningún valor.

Figura 73: Mapas de la velocidad de vientos según cuatro rangos horarios - Caso N°2

25/07/2019. Rango horario 1

25/07/2019. Rango horario 2



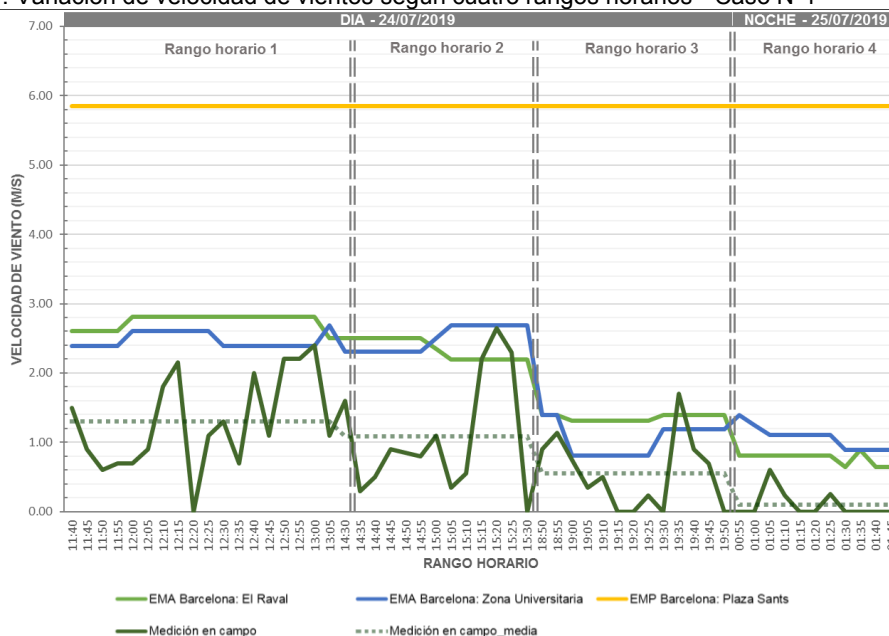


Fuente: Elaboración propia con información registrada en campo en 25/07/19 y 26/07/19

Los siguientes gráficos muestran el análisis de los datos de la velocidad de viento y las líneas reflejan la variación de los éstos datos a lo largo del día según distintas fuentes de información. En el primer caso, durante los dos primeros rangos, los datos de la velocidad de viento de las estaciones públicas oscilan de 2.2 a 2.8m/s, mientras por la tarde y noche, oscilan de 0.8 a 1.4m/s. Las velocidades de viento registradas en campo varían mucho a lo largo del día y noche con un pico (2.7m/s) a las 15:20 horas, sin embargo, la media de ésta última, tiende a disminuir hacia la noche de 1.3m/s hasta 0.5m/s. Por otra parte, la registrada por la estación privada obtiene una media de 5.85m/s.

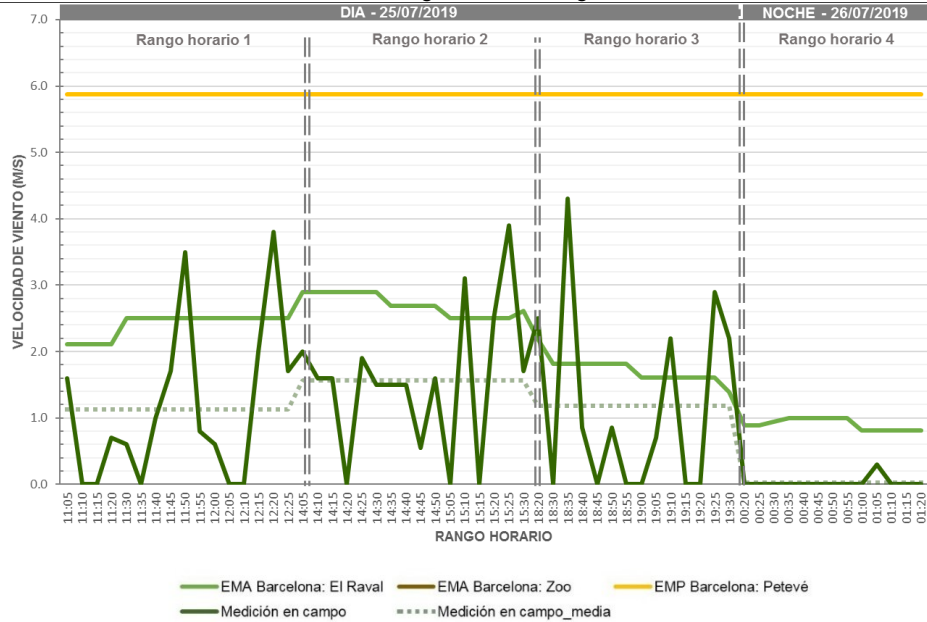
En el segundo caso, la media de la velocidad de viento registrada en campo es inferior al de la estación pública, cuya diferencia durante el día y noche es de 1m/s. Respecto a las máximas velocidades de viento, se registran 4 a lo largo del día superando los 3.1m/s y alcanzando los 4.3m/s a las 18:35 horas.

Figura 74: Variación de velocidad de vientos según cuatro rangos horarios - Caso N°1



Fuente: Elaboración propia con información de Meteocat, Meteoclimatic y registro en campo en 24/07/19 y 25/07/19

Figura 75: Variación de velocidad de vientos según cuatro rangos horarios - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia con información de Meteocat, Meteoclimatic y registro en campo en 25/07/19 y 26/07/19

Para resumir los datos de las variables climáticas, se genera la siguiente tabla con los valores medios de día y noche para los casos de estudio. Además, se ha considerado datos de sólo una estación pública por caso de estudio, el cual presente la información más consecuente al registrado en campo.

En esta tabla se observa que la temperatura media del aire registrada en campo es superior a las obtenidas por las estaciones -en los dos casos de estudio-, superando en 1°C el primer caso al segundo, durante el día; mientras por la noche, se mantiene en 27°C. La humedad relativa media y la velocidad de viento media durante el día es mayor en el segundo caso, mientras por la noche, lo es el primer caso.

Tabla 21: Comparación de valores medios de las variables climáticas de los dos casos de estudio

Variable	CASO 1						CASO 2					
	DIA			NOCHE			DIA			NOCHE		
	Estación pública	Estación privada	Registro en campo	Estación pública	Estación privada	Registro en campo	Estación pública	Estación privada	Registro en campo	Estación pública	Estación privada	Registro en campo
Tam	29.25	31.30	31.50	25.90	25.25	27.58	28.40	28.58	30.46	26.70	24.00	27.93
HRm	61.82	55.99	59.76	79.64	87.38	76.17	74.88	66.35	67.74	63.82	79.42	72.54
VVm	2.00	5.85	0.97	0.76	5.85	0.11	2.28	5.87	1.26	0.90	5.88	0.04
Pam	1015.18	1010.95	1014.65	1014.67	1010.95	1014.50	1013.59	1113.40	1047.68	1012.45	996.29	996.29

Fuente: Elaboración propia con información de Meteocat, Meteoclimatic y registro en campo en 24/07/19 al 26/07/19

5.4. Modelo de simulación de *LST* según mediciones en campo

El análisis de temperatura de superficie, se realiza desde dos enfoques: primero por la tipología de coberturas existentes en el caso de estudio (tabla 15) y segundo, por los puntos de medición (incluye temperatura de varios tipos de coberturas). Desde el primer enfoque se pretende describir las temperaturas registradas en campo durante el día y noche diferenciadas según efectos de sol - sombra y demostrar la variación de los tipos de coberturas mediante gráficos de columnas agrupadas; asimismo, describir el comportamiento y diferencia de las temperaturas media de día y noche según tipo de cobertura mediante gráficos de líneas.

Por otro lado, en el segundo enfoque se presenta modelos de simulación de la temperatura de superficie de los 4 rangos horarios según los puntos de medición registrados en campo; posterior a ello, mediante gráficos de líneas se muestra la comparación de las temperaturas de superficie medias de día y noche registradas en campo respecto a la temperatura de superficie media de día calculado según imagen satelital Landsat-8.

▪ Análisis del *LST* por tipología de coberturas

Como primer enfoque se presenta la tabla 22, con el promedio de temperaturas de superficie según la tipología de coberturas registradas en campo a través de los puntos de medición, comparando las 8 coberturas del primer caso con las 6, del segundo; habiendo de señalar que los casos de estudio presentan coincidencia sólo en 4 tipos de cobertura -asfalto color negro, panot “4 tabletas”, loseta lisa de 40x60cm y suelo desnudo o con poca vegetación- (para el detalle revisar tabla 15)

Se observa, en ambos casos de estudio, que todos tipos de coberturas expuestos al sol incrementan su temperatura de la mañana -rango horario 1- al pico más alto de la tarde -rango horario 2-, pero los registrados en el rango horario 3 no superan a los de la mañana y continúan disminuyendo en la noche. Sin embargo, es notoria la diferencia de temperaturas de superficies media en el día alcanzados por ambos casos de estudio, el primero de 44 a 56°C (55.7°C se atribuye a la cobertura de “suelo desnudo o con poca vegetación”) y el segundo de 32 a 36°C.

Por otra parte, todos los tipos de cobertura bajo efectos de sombra incrementan su temperatura de la mañana -rango horario 1- al pico más alto de la tarde -rango horario 2-, pero los registrados en el rango horario 3 sí superan a los de la mañana (contrario a lo que sucede en el primer caso) y continúan disminuyendo en la noche. Los rangos de ambos casos de estudio son similares obteniéndose de 29 a 36°C en el primer caso mientras en el segundo de 30 a 34°C. Se registró temperaturas de superficie de noche y se utilizan como medio de comparación para los datos arrojados según los efectos de sol y sombra, como resultado señala que en noche ambos oscilan en el rango de 28 a 30°C, con una temperatura de superficie media similar de 29°C.

Al realizar la comparación de temperaturas de superficie por tipos de coberturas bajo efectos sol y sombra por cada caso, se desprende que la media expuesta al sol alcanza 47.31°C y supera en 12°C a la expuesta en sombra en el primer caso (34.78°C); mientras que en el segundo caso la diferencia media es de 2°C, entre las expuestas al sol (34.90°C) y sombra (32.90°C).

Asimismo, el dato particular es la temperatura de superficie media expuesta al sol del segundo caso que obtiene 34°C del mismo modo que la temperatura de superficie media en sombra del primer caso.

Tabla 22: LST por tipología de coberturas soleadas y sombreadas de los casos de estudio

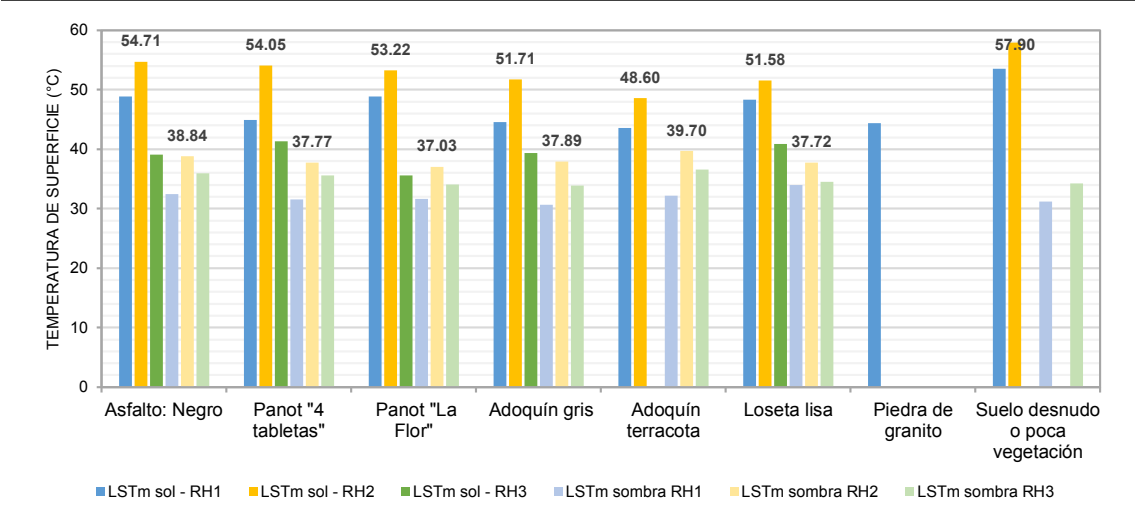
Descripción de coberturas	CASO 1					CASO 2				
	DIA				NOCHE	DIA				NOCHE
	RH1	RH2	RH3	MEDIA	RH4	RH1	RH2	RH3	MEDIA	RH4
COBERTURAS SOLEADAS										
Asfalto: Negro	48.84	54.71	39.07	47.54	30.33	41.48	51.27	35.48	36.65	30.06
Asfalto: Rojo						44.28	51.55	34.65	36.09	30.10
Cemento hidráulico: Panot "4 tabletas"	44.94	54.05	41.30	46.76	30.92	41.57	48.40	35.51	35.35	29.63
Cemento hidráulico: Panot "La Flor"	48.83	53.22	35.60	45.88	29.35					
Hormigón: Adoquín gris	44.51	51.71	39.40	45.21	28.95					
Hormigón: Adoquín terracota	43.55	48.60	-	46.08	28.40					
Hormigón: Loseta lisa	48.36	51.58	40.87	46.94	29.70	38.81	46.40	36.30	34.63	29.33
Piedra de granito	44.40	-	-	44.40						
Arena						39.97	54.17	31.73	33.90	28.30
Suelo desnudo o con poca vegetación	53.50	57.90	-	55.70	29.50	44.70	47.14	31.79	32.75	28.44
				47.31	29.59				34.90	29.31
COBERTURAS SOMBRADAS										
Asfalto: Negro	32.42	38.84	35.98	35.75	30.33	31.48	38.31	32.20	34.00	30.06
Asfalto: Rojo						30.80	36.57	31.80	33.06	30.10
Cemento hidráulico: Panot "4 tabletas"	31.57	37.77	35.63	34.99	30.92	30.19	35.56	31.18	32.31	29.63
Cemento hidráulico: Panot "La Flor"	31.60	37.03	34.08	34.23	29.35					
Hormigón: Adoquín gris	30.67	37.89	33.91	34.16	28.95					
Hormigón: Adoquín terracota	32.20	39.70	36.60	36.17	28.40					
Hormigón: Loseta lisa	34.00	37.72	34.55	35.42	29.70	31.47	37.78	33.78	34.34	29.33
Piedra de granito										
Arena						30.80	37.70	30.20	32.90	28.30
Suelo desnudo o con poca vegetación	31.20	-	34.25	32.73	29.50	29.59	32.61	30.20	30.80	28.44
				34.78	29.59				32.90	29.31

Fuente: Elaboración propia

La figura 76 muestra mediante barras de color sólido las temperaturas de superficie expuestas al sol mientras que las barras ligeramente tenues, las expuestas a sombra. Y de ellas se observa que el "suelo desnudo o con poca vegetación" obtiene las mayores temperaturas media expuestas al sol en la mañana -rango horario1- con 53.50°C y en el pico más alto del día -rango horario 2- con 57.90°C, comparándolas con sus similares en el mismo rango; mientras que las menores temperaturas las registra el adoquín color terracota en estos mismos rangos horarios. En la tarde -rango horario 3- el panot" La Flor" registra 5°C menos que el resto de coberturas que oscilan entre 39 a 40°C.

Respeto a las coberturas bajo efectos de sombra, en la mañana las temperaturas medias oscilan entre 30 a 34°C (la máxima registrada para la loseta 40x60cm), en el pico más alto del día este rango se acorta de 4 a 2 grados (37 a 39°C) siendo el adoquín color terracota el único que alcanza 39.70°C. Por la tarde el adoquín color terracota presenta mayor temperatura media de 36°C y el adoquín color gris, la mínima media de 33.91°C.

Figura 76: Variación de LST día por tipología de cobertura soleadas y sombreadas - Caso N°1

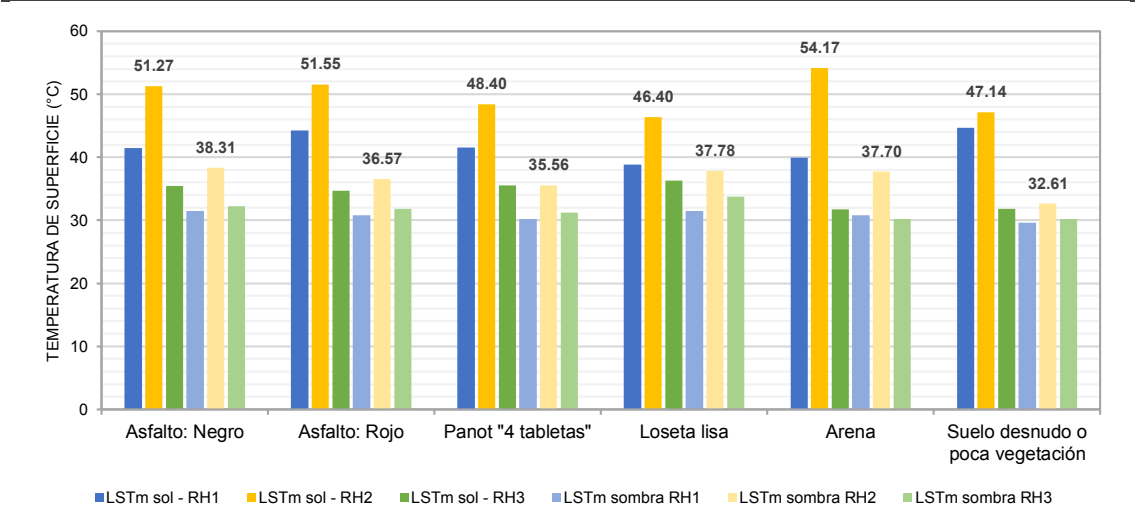


Fuente: Elaboración propia

La figura 77 muestra mediante barras de color sólido las temperaturas de superficie expuestas al sol mientras que las barras ligeramente tenues, las expuestas a sombra para el caso 2. Y de ellas se observa sin bien el asfalto color rojo y el suelo desnudo o con poca vegetación alcanzan la temperatura media más alta (44°C) en horas de la mañana, la arena los supera durante el pico más alto del día hasta alcanzar 54.17°C y con 3 grados menos le siguen el asfalto tanto de color negro (51.27°C) como rojo (51.55°C). Por la tarde, la arena y el suelo desnudo o con poca vegetación registran las menores temperaturas medias de 31.73°C y 31.79°C, respectivamente.

Respeto a las coberturas bajo efectos de sombra, por la mañana varían entre 29 a 31°C, pero el asfalto color negro alcanza 38.3°C y el suelo de desnudo o con poca vegetación, 32.61°C en el pico más alto del día. En la tarde, las temperaturas medias oscilan entre 30 a 33°C.

Figura 77: Variación de LST día por tipología de cobertura soleadas y sombreadas - Caso N°2



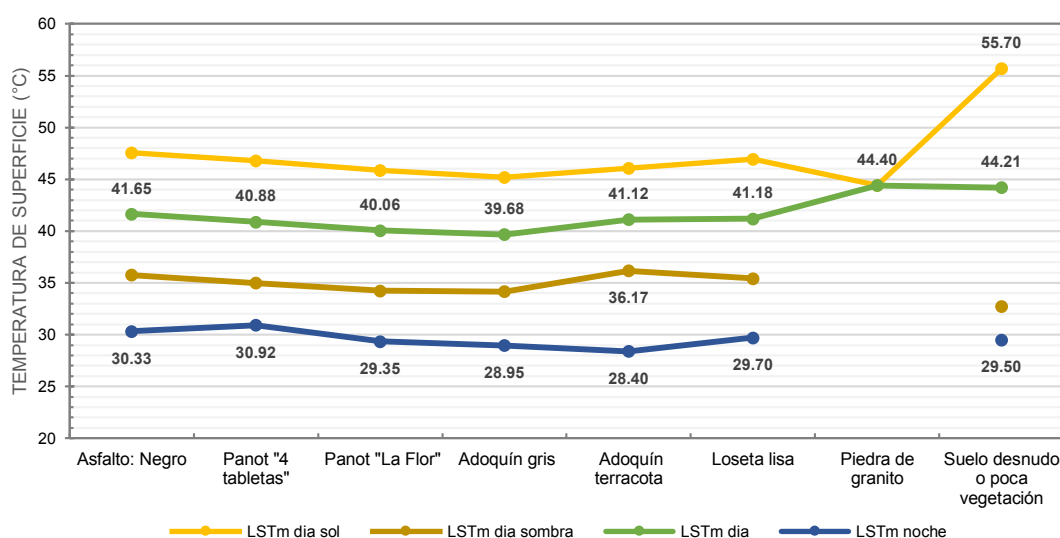
Fuente: Elaboración propia

Mediante el gráfico de líneas se representa el comportamiento de la temperatura de superficie media de día -con líneas discontinuas la temperatura media bajo efectos de sol y sombra- y noche de las coberturas del segundo caso de estudio.

Las temperaturas medias expuestas al sol varían entre 45 a 55°C, predominando la temperatura de superficie del suelo desnudo o poca vegetación (55.70°C), mientras que los están bajo efectos de sombra, esta misma cobertura registra la menor temperaturas (33°C) y la mayor temperatura, por el adoquín color terracota (36.17°C). En la noche, las temperaturas de todas las coberturas bajan hasta alcanzar 28.40°C, el de menor temperatura registrado para el adoquín color terracota.

De todo esto, se desprende que las diferencias de temperatura de día y noche según tipología de coberturas va de 11 a 14 grados y las de sombra respecto al de sol va de 11 a 19 grados.

Figura 78: Variación de LST día y noche por tipología de cobertura según efectos de sol y sombra - Caso N°1



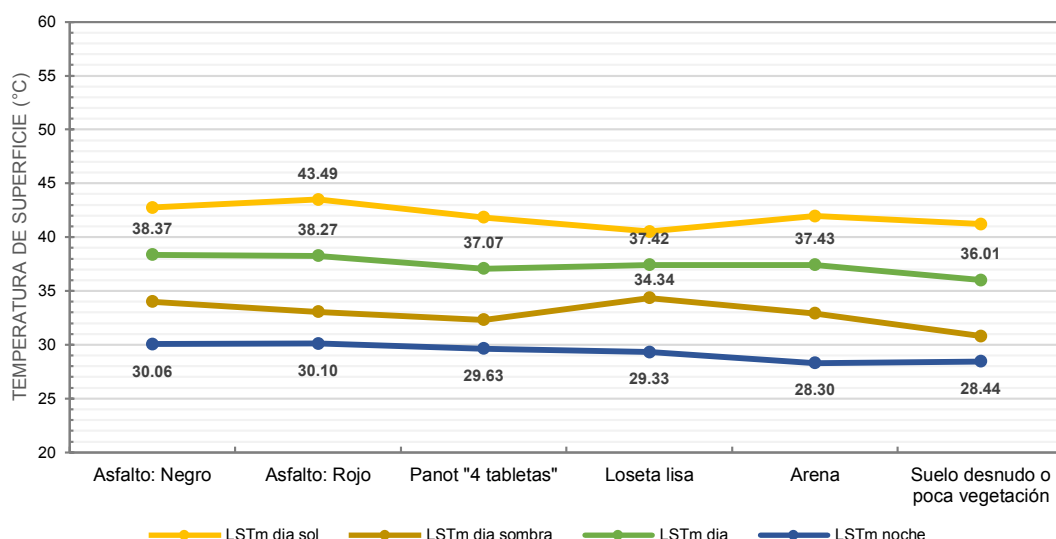
Fuente: Elaboración propia

Mediante el gráfico de líneas se representa el comportamiento de la temperatura de superficie media de día -con líneas discontinuas la temperatura media bajo efectos de sol y sombra- y noche de las coberturas del segundo caso de estudio.

Las temperaturas medias expuestas al sol varían entre 41 a 43°C (2 grados inferiores al primer caso de estudio), predominando la temperatura de superficie del asfalto color rojo (43.40°C), mientras que los están bajo efectos de sombra, el suelo desnudo o con poca vegetación registra la menor temperaturas (31°C) y la mayor temperatura, por la loseta 40x60cm (34.34°C). En la noche, las temperaturas de todas las coberturas bajan hasta alcanzar 28.30°C, el de menor temperatura registrado la arena.

De todo esto, se desprende que las diferencias de temperatura de día y noche según tipología de coberturas va de 6 a 8 y las de sombra respecto al de sol va de 6 a 9 grados. Resultados que registran la mitad de los obtenido por el primer caso de estudio; 11 a 14 grados y 11 a 19 grados, respectivamente.

Figura 79: Variación de LST día y noche por tipología de cobertura según efectos de sol y sombra - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia

▪ Análisis del LST por puntos de medición

El segundo enfoque desarrolla las temperaturas de superficie según los puntos de medición registrados en campo, quiere decir, que cada punto de medición representa la media de las temperaturas de superficie de las distintas tipologías de coberturas que se ubican más próximas, en un radio de 5 metros desde el punto de medición aprox.

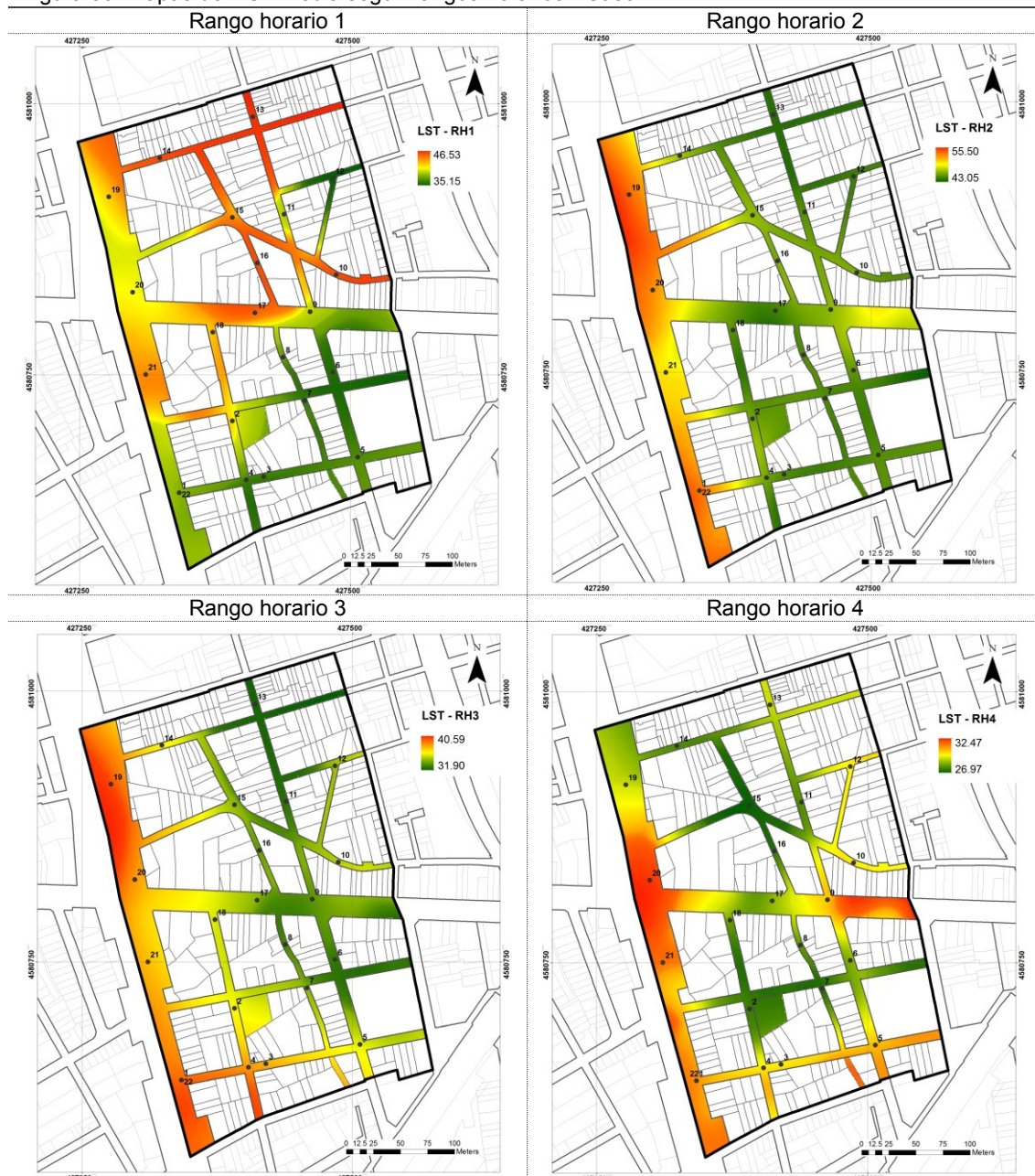
En el primer caso (figura 80), tras unas horas luego del amanecer, la zona que concentra mayor temperatura de superficie se sitúa al norte en los puntos de medición 13, 16 y 10 alcanzando 46.53°C, mientras que al sur se observa concentración de menores temperaturas, no obstante, el punto de medición 12 obtiene el menor valor con 35.15°C.

Un par de horas después, las temperaturas de superficie medias se incrementan en 9°C, promedio tanto en la máxima como en la mínima, las máximas se ubican sobre eje de la Rambla de Badal cuyas temperaturas oscilan entre 53 a 55°C mientras que el resto de superficie obtiene temperaturas menores 53°C incidiendo con menor radiación al noreste, sur y al centro -punto de medición 18 con 40.35°C-.

Por la tarde, la temperatura de superficie disminuye en 13°C, promedio tanto en la máxima como en la mínima, respecto al anterior rango horario. Se observa altas temperaturas de superficies al norte y sur del eje de la Rambla de Badal que disminuyen en dirección noreste, por lo tanto, el punto de medición más lejano -punto 18- obtiene la menor temperatura registrada en este rango horario de 31.90°C.

Por la noche este descenso continúa hasta 6°C menos respecto al anterior rango horario, y las temperaturas más altas se ubican sobre las vías más anchas y principales del caso de estudio -Rambla de Badal, en el punto 20- y en Carrer de Sants, punto 9-, ambos con 32 °C. Por otro lado, los menores registros se ubican sobre el eje de una vía interna o secundaria tanto al norte como al sur punto 15 y punto 7, respectivamente-.

Figura 80: Mapas del LST media según rangos horarios - Caso 1



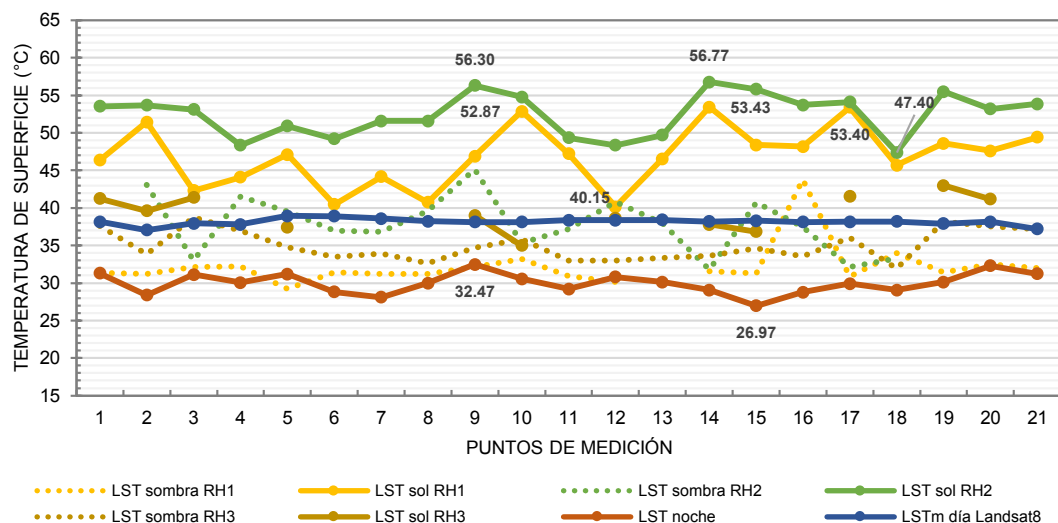
Fuente: Elaboración propia

El primer gráfico de líneas presenta la variación de la temperatura de superficie, diferenciados por la exposición al sol y sombra, durante los 4 rangos horarios registrados en el día y noche del caso de estudio N°1. El comportamiento de las temperaturas de superficies expuestas al sol tiende a aumentar -en todos los puntos registrados- desde la mañana hasta las horas pico más alto del día, sin embargo, los registros en la mañana consideran importantes diferencias de temperatura entre puntos -desde 40 a 53°C, min. y máx., respectivamente-.

Durante las siguientes horas, las temperaturas disminuyen de 35°C, temperatura mínima registrada por la tarde hasta 26°C, registrado en la noche. Respecto a las temperaturas de superficie expuestas a efectos de sombra, presentan un aumento durante el día, pero no uniforme en todos los puntos de medición, esto puede deberse a la proporción de coberturas que involucre el punto.

Respecto a la *LST*_m de día calculada por imagen satelital de Landsat-8, se observa que las temperaturas de los puntos de medición son muy homogéneas, entre un rango de 37 a 39°C, y se está más relacionada a la *LST* expuesta al sol en la tarde -rango horario 3-.

Figura 81: Variación del *LST* día y noche por puntos de medición según efectos de sol y sombra - Caso N°1

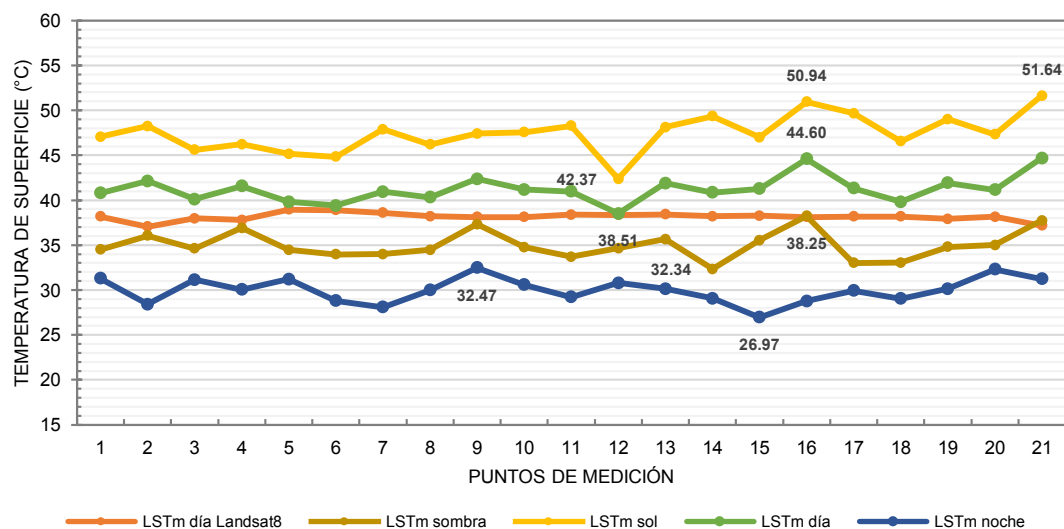


Fuente: Elaboración propia

Este segundo gráfico de líneas muestra la variación de las temperaturas de superficie media de sol, sombra, día y noche, comparándolos con el *LST*_m de día calculada por imagen satelital de Landsat-8 del caso N°1. Para este caso, la *LST* de día según registro en campo está más correlacionada al *LST*_m sol -a un grado de 0.86-, que al *LST* sombra -a un grado de 0.73-. Mientras que la *LST*_m de día y noche no alcanzan un grado de correlación moderada, registran en varios puntos picos altos de temperatura -44.60°C y 32.47°C, respectivamente-.

Respecto al *LST*_m de satélite, no registra una correlación relevante con sus pares sino por el contrario, una correlación negativa.

Figura 82: Variación del *LST* media de día y noche por puntos de medición según efectos de sol y sombra - Caso N°1

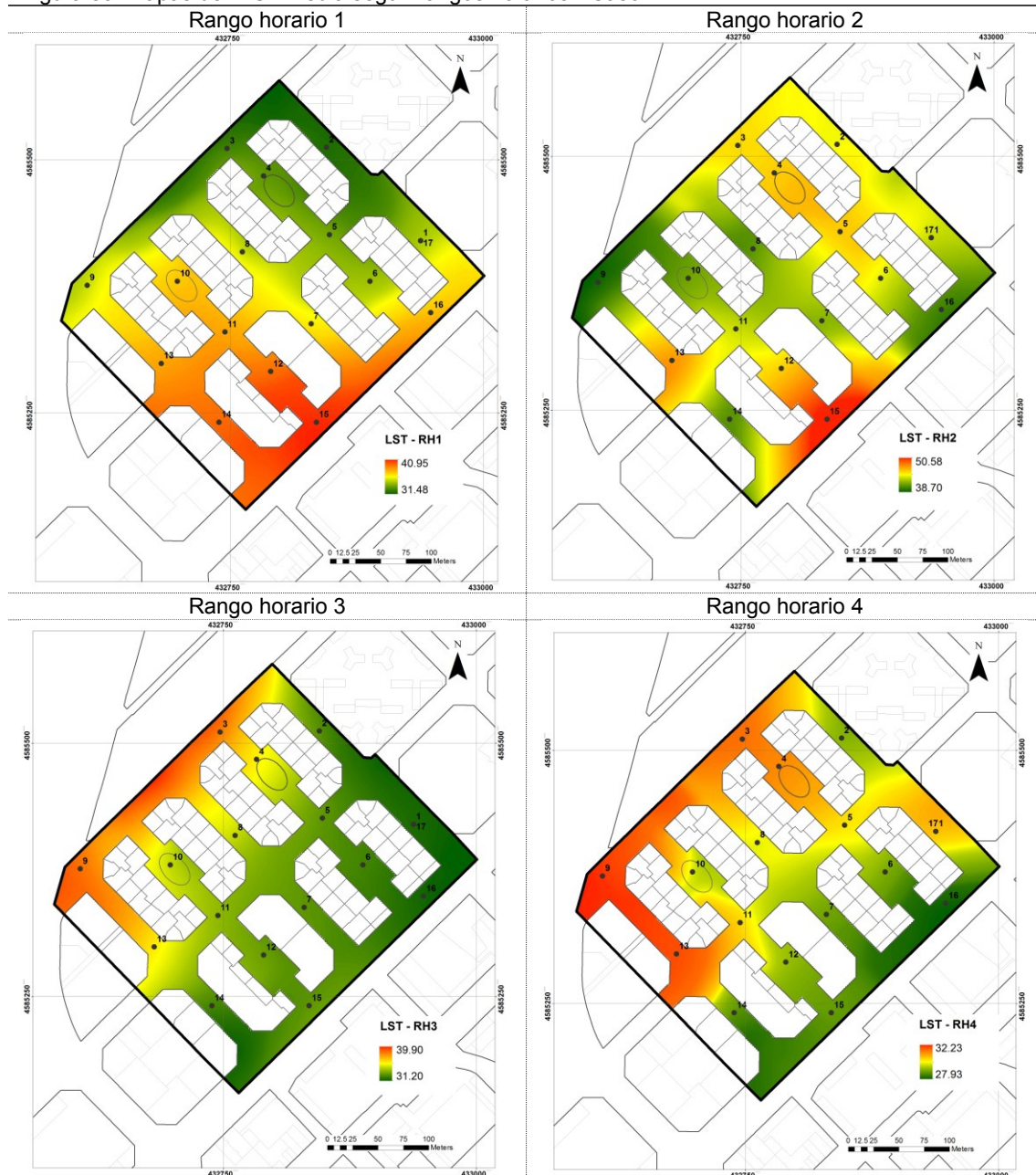


Fuente: Elaboración propia

En el segundo caso (figura 83), tras unas horas luego del amanecer, claramente se observa la concentración de las temperaturas de superficies más altas en el sur, siendo el punto 15 el que obtiene 40.95°C seguido de una de las plazas -punto 12-. Las temperaturas de superficies tienden bajar en dirección norte siendo los puntos más lejanos -2, 3 y 5- los que obtienen 31°C.

Un par de horas después, las temperaturas de superficie medias se incrementan en 9°C, promedio tanto en la máxima como en la mínima, y el punto 15 mantiene la temperatura más alta pero esta vez alcanza los 50°C, mientras el resto registra temperaturas que oscilan entre 40 a 47°C; la temperatura mínima se registra al noroeste -en el punto 9-.

Figura 83: Mapas del LST media según rangos horarios - Caso 2



Fuente: Elaboración propia

Por la tarde, la temperatura de superficie disminuye en 9°C, promedio tanto en la máxima como en la mínima, respecto al anterior rango horario. Se observa altas temperaturas sobre el eje vial en el norte, en los puntos -3 y 9- alcanzando los 39°C, mientras que las bajas temperaturas se registran al sur, en los extremos de la Rambla de Guipúzcoa -puntos 1, 16 y 14-. Por la noche este descenso continúa hasta 9°C menos respecto al anterior rango horario, y las temperaturas más altas tienden a ubicarse hacia el oeste concentrándose sobre los puntos 9 y 13 con 31 a 32°C. Del mismo modo, las temperaturas más bajas se ubican sobre el suroeste, pero sigue siendo el punto 16 el registro mínimo con 27°C

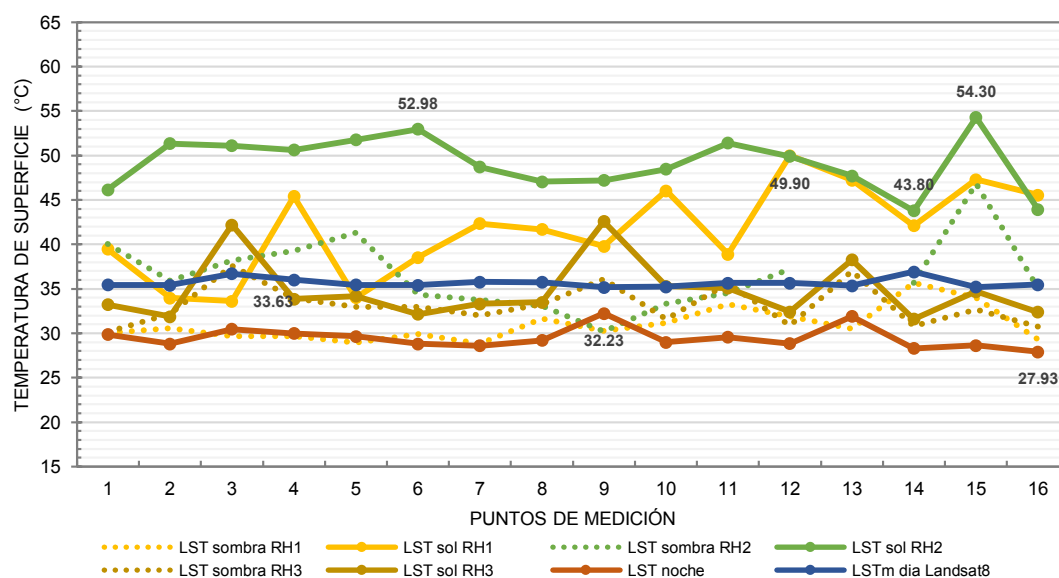
El segundo gráfico de líneas presenta la variación de la temperatura de superficie, diferenciados por la exposición al sol y sombra, durante los 4 rangos horarios registrados en el día y noche del caso de estudio N°2.

El comportamiento de las temperaturas de superficies expuestas al sol tiende a aumentar - en todos los puntos registrados- desde la mañana hasta las horas pico más alto del día, sin embargo, los registros en la mañana consideran importantes diferencias de temperatura en todos los puntos de medición -desde 33°C a 50°C, min. y máx., respectivamente- con tendencia a incrementar temperaturas hacia los ultimo puntos de medición (podría deberse a la duración de tiempo del registro en campo).

Durante las siguientes horas, las temperaturas disminuyen de 44°C, temperatura mínima registrada por la tarde hasta 27°C, registrado en la noche. Respecto a las temperaturas de superficie expuestas a efectos de sombra, presentan un aumento durante el día, pero no uniforme en todos los puntos de medición, esto puede deberse a la proporción de coberturas que involucre el punto.

Respecto a la *LSTm* de día calculada por imagen satelital de Landsat-8 (la misma utilizada para el Caso N°1), se observa que las temperaturas de los puntos de medición son muy homogéneas, entre un rango de 35 a 36°C. Cabe mencionar lo interesante del comportamiento entre *LST* sol y el *LST* sombra por la tarde -rango horario3-, debido que varios de los puntos de medición son similares.

Figura 84: Variación del *LST* día y noche por puntos de medición según efectos de sol y sombra - Caso N°2

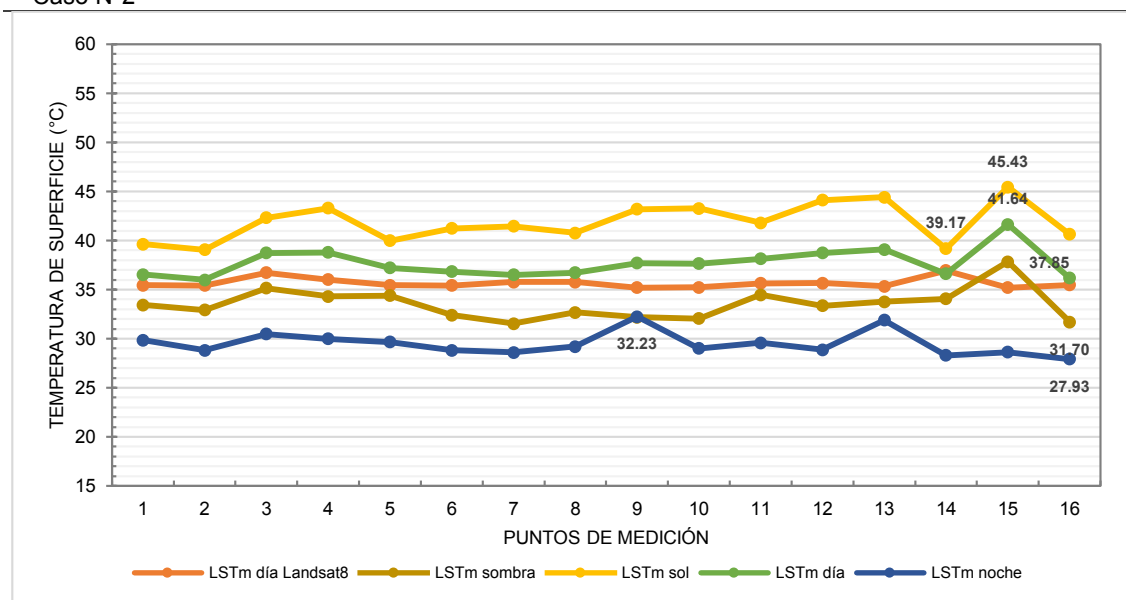


Fuente: Elaboración propia

Este segundo gráfico de líneas muestra la variación de las temperaturas de superficie media de sol, sombra, día y noche, comparándolos con el *LSTm* de día calculada por imagen satelital de Landsat-8 del caso N°2. Para este caso, la *LST* de día según registro en campo está más correlacionada al *LSTm* sol -a un grado de 0.86-, que al *LST* sombra -a un grado de 0.79-. Mientras que la *LSTm* de día y noche no alcanzan un grado de correlación moderada, registran en varios puntos picos altos de temperatura -41.64°C y 32.23°C, respectivamente-.

Respecto al *LSTm* de satélite, no registra una correlación relevante con sus pares sino por el contrario, una correlación negativa, excepto con el *LSTm* sombra. (Para ver el detalle de las correlaciones de Pearson de la *LSTm* del caso N°2, tabla 28)

Figura 85: Variación de *LST* media de día y noche por puntos de medición según efectos de sol y sombra - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia

Durante la noche, la distribución espacial del *LST* varía en los dos casos de estudio de variables físicas diferentes, tras haber realizado una sustracción del *LST* de día y *LST* de noche según las mediciones en campo.

El primer caso de estudio en el barrio de Sants, presenta diferencias entre 7.71 a 15.83°C y las más altas (superiores a 12.84°C, para este caso) se registran sobre vías vehiculares secundarias y sobre una Rambla: 3 puntos de medición (7,15 y 16) en el eje longitudinal intermedio -Carrer Reira de Escuder- en el punto de medición 21 de la Rambla de Badal y en el punto de medición 2 -próxima al huerto-.

Por otro lado, la más bajas, se registran en ubicaciones puntuales distribuidas heterogéneamente: al norte en el punto 12, al sur en el punto 5 y al oeste en el punto 20.

Figura 86: LSTm diferencia – Caso N°1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 23: Diferencia del LST media, según puntos de medición - Caso N°1

Puntos de medición	LSTm día	LSTm noche	LSTm diferencia
1	40.78	31.30	9.48
2	42.14	28.40	13.74
3	40.12	31.13	8.99
4	41.57	30.05	11.52
5	39.82	31.20	8.62
6	39.39	28.80	10.59
7	40.94	28.10	12.84
8	40.33	30.00	10.33
9	42.36	32.47	9.89
10	41.17	30.57	10.60
11	40.98	29.20	11.78
12	38.51	30.80	7.71
13	41.89	30.13	11.76
14	40.84	29.07	11.77
15	41.28	26.97	14.31
16	44.60	28.77	15.83
17	41.34	29.93	11.41
18	39.80	29.05	10.75
19	41.91	30.13	11.78
20	41.16	32.30	8.86
21	44.69	31.23	13.46

Fuente: Elaboración propia

El segundo caso de estudio en el barrio de Sant Martí de Provençals, presenta diferencias entre 5.60 a 13.01°C (dos grados menos que el caso N°1) y las más altas (superiores a 9.87°C, para este caso) se registran sobre una plaza y una Rambla: el registro más alto se ubica en el punto de medición 15 sobre la Rambla de Guipúzcoa y el siguiente en el 12 -en un contexto de plaza-.

Por otro lado, las más bajas, se registran en ubicaciones extremas, al oeste en el punto de medición 9 y al este en el punto de medición 1.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Diferencia del LST media, según puntos de medición - Caso N°2

Puntos de medición	LSTm día	LSTm noche	LSTm diferencia
1	36.53	29.86	6.67
2	35.99	28.83	7.16
3	38.73	30.47	8.26
4	38.80	30.00	8.80
5	37.20	29.67	7.53
6	36.82	28.83	7.99
7	36.50	28.60	7.90
8	36.72	29.20	7.52
9	37.69	32.23	5.60
10	37.66	29.00	8.66
11	38.14	29.57	8.57
12	38.73	28.86	9.87
13	39.09	31.90	7.19
14	36.62	28.30	8.32
15	41.64	28.63	13.01
16	36.17	27.93	8.24

Fuente: Elaboración propia

5.5. Composición mediante ráster de *LST* (resolución 2.5m² por pixel)

Las imágenes satelitales son múltiples y mediante el uso de la teledetección se ha aplicado a ámbitos urbanos, ámbito que ha visto un crecimiento cuantioso de interés científico y académico. Entre ellas, aplicados al parcelario catastral, morfología y estructura urbana como sus expansiones, coberturas de suelo, usos de suelo, cartografía de redes (transporte, infraestructura y equipamiento urbano, arbolado, vegetación) e inclusive como instrumento de gestión urbana (Cardozo & Da Silva, 2012). Si bien la teledetección, se caracteriza por registrar la información pormenorizada, es la resolución espacial³³ -específicamente- la que permite conocer la interpretación más detallada de la información, a través de su valor mínimo denominado pixel.

Desde hace 50 años, la teledetección presentaba resoluciones de alta definición, es en 1993 cuando sus fines pasan de ser solamente científico a comerciales. Hoy en día, existen imágenes satelitales libres y de pago, dentro del último se encuentra como líder las de sensor Quick Bird -que alcanza una resolución de 60cm- o las del sensor GeoEye 1 -de 0.41m de resolución- entre otros, para representaciones cartográficas o de mayor resolución para el ámbito ambiental. (Cardozo & Da Silva, 2012)

Por tanto, se genera un ráster de 2.5m²/pixel como representación de una mejor resolución, comparada a las imágenes de satélite de Landsat-8 o Modis -de acceso libre-, que son las más empleadas a escala urbana en Barcelona. Este ráster se genera tras el registro de temperaturas de superficie en campo y los que son procesadas en Arcgis sus valores medios por pixel, con el propósito de presentar una alternativa para el estudio de superficies sombreadas, en el microclima.

Figura 88: Ráster de 2.5m² por pixel del *LST* máxima de día – Caso N°1



Fuente: Elaboración propia

³³ La resolución espacial es una de las 4 manifestaciones -junto a la resolución espectral, resolución radiometría y resolución temporal- implicadas en la resolución de un sensor, que es la principal característica de la teledetección (Cardozo & Da Silva, 2013)

Figura 89: Ráster de 2.5m² por pixel del *LST* máxima de día – Caso N°1



Fuente: Elaboración propia

5.6. Modelos de Correlación de Pearson y Regresión simple

Para determinar el grado de relación lineal de las variables climáticas y morfológicas de distintas fuentes, implica realizar Correlaciones lineales representadas mediante tablas en Excel; el objeto de estos es cuantificar su magnitud y tendencia -creciente o positiva, decreciente o negativa-.

Las variables que involucren mayor relación se representan mediante gráficos de dispersión para considerar posibles modelos lineales entre las variables seleccionadas -dependiente e independiente-. El análisis se realiza desde dos enfoques, según tipología de coberturas y puntos de medición -del mismo modo que el apartado 5.4-.

▪ Análisis de Correlación lineal por tipología de coberturas

La tabla 25 registra los coeficientes de relación entre el *LST* de día y noche, registrados en campo con la superficie ocupada y ambos bajo efectos de sol y sombra, para el primer caso de estudio. En esta tabla se han seleccionado las variables cuantitativas que mayor magnitud y tendencia presentan, omitiéndose las siguientes: la superficie total ocupada por tipo de cobertura y el *LST* por día bajo efectos de sol y sombra.

A simple vista, se aprecia que no existe un grado de dependencia fuerte entre el *LST* y su superficie respectiva, según efectos de sol y sombra en los distintos rangos horarios registrados en el día (éstas relaciones se resaltan en color amarillo, tabla 25), las relaciones con valores más altos sólo alcanzan a 0.48. Sin embargo, existe una correlación creciente entre dos superficies: la ocupada por el *LST sol-rango horario 3* con la ocupada por el *LST de noche* de valor 0.64.

Las relaciones entre el *LST* bajo efectos de sol y sombra (estas relaciones se resaltan en color azul, tabla 25), se observa correlaciones crecientes fuertes entre el *LSTm sol* con el *LST sol-rango horario 1* de valor 0.84, y entre el *LSTm sombra* con el *LST sombra-rango horario 2* de valor 0.83. Mientras que, el *LSTm día* registra un grado de dependencia lineal positivo y moderado con el *LST sol-rango horario 2*, que alcanza el valor de 0.67.

Tabla 25: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según material de coberturas - Caso N°1

Efecto sol y sombra	SUPERFICIE (M2)						TEMPERATURA DE SUPERFICIE (°C)					
	SOL			SOMBRA			SOL			SOMBRA		
	RH1	RH2	RH3	RH1	RH2	RH3	LSTm RH1	LSTm RH2	LSTm RH3	LSTm RH1	LSTm RH2	LSTm RH3
Rango horario												
LSTsol RH1	0.43	0.33	0.33	-0.02	0.11	0.13	1.00					
LSTsol RH2	0.14	0.21	0.23	0.07	-0.08	-0.06	0.82	1.00				
LSTsol RH3	0.31	0.47	0.48	0.52	0.31	0.19	-0.48	-0.12	1.00			
LSTsol DIA	0.15	0.10	0.13	-0.17	-0.18	-0.15	0.84	0.78	0.38			
LSTsombra RH1	0.77	0.59	0.67	0.15	0.49	0.30	0.05	-0.30	0.31	1.00		
LSTsombra RH2	-0.03	-0.03	0.06	-0.08	-0.11	-0.21	-0.45	-0.50	0.42	0.13	1.00	
LSTsombra RH3	0.00	0.07	0.24	0.04	-0.09	-0.29	-0.43	-0.35	0.43	0.29	0.85	1.00
LSTsombra DIA	0.29	0.31	0.39	0.30	0.36	0.18	-0.63	-0.71	0.50	0.60	0.83	0.77
LST DIA	-0.08	-0.19	-0.06	-0.48	-0.44	-0.51	0.34	0.67	0.44	0.04	0.57	0.06
LST NOCHE	0.36	0.57	0.64	0.53	0.27	0.15	0.20	0.55	0.50	0.14	-0.33	0.11

Fuente: Elaboración propia

La tabla 26 registra los coeficientes de relación entre *LST* de día y noche, registrados en campo con la superficie ocupada y ambos bajo efectos de sol y sombra, para el segundo caso de estudio. En esta tabla se han seleccionado las variables cuantitativas que mayor magnitud y tendencia presentan, omitiéndose las siguientes: la superficie total ocupada por tipo de cobertura y el *LST* de noche -en la columna vertical-.

A simple vista, se aprecia que no existe un grado de dependencia fuerte entre el *LST* y su superficie respectiva, según efectos de sol y sombra en los distintos rangos horarios registrados durante el día (estas relaciones se resaltan en color amarillo, tabla 26), pero sí una relación moderada durante el rango horario 3, entre la *superficie* y el *LST* expuesto al sol con valor de 0.61.

Las relaciones entre el *LST* bajo efectos de sol y sombra (estas relaciones se resaltan en color azul, tabla 26), se observa correlaciones crecientes fuertes entre el *LSTm sol* con el *LST sol-rango horario 3* de valor 0.73, entre el *LSTm sombra* con el *LST sombra-rango horario 1* de valor 0.99. Mientras que, el *LSTm noche* registra un grado de dependencia lineal positivo y fuerte con el *LSTm día* de valor 0.82, y con el *LSTm sol* de valor 0.94.

Tabla 26: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según material de coberturas - Caso N°2

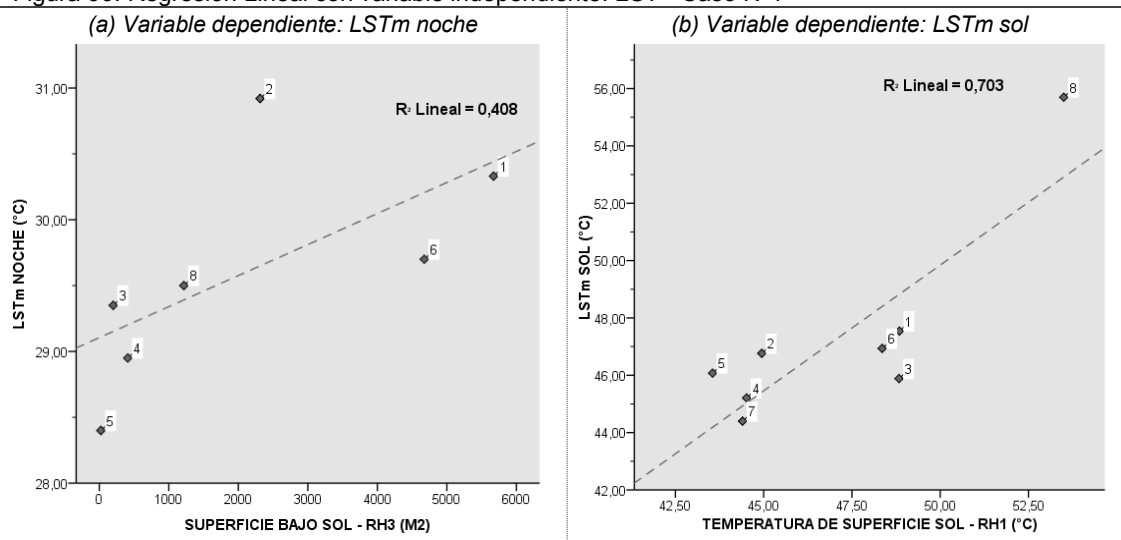
Efecto sol y sombra	SUPERFICIE (M2)						TEMPERATURA DE SUPERFICIE (°C)								
	SOL			SOMBRA			SOL				SOMBRA				LST DIA
Rango horario	RH1	RH2	RH3	RH1	RH2	RH3	LSTm RH1	LSTm RH2	LSTm RH3	LSTsol DIA	LSTm RH1	LSTm RH2	LSTm RH3	LST sombra DIA	
LSTsol RH1	-0.05	-0.08	-0.21	-0.10	-0.03	-0.02	1.00								
LSTsol RH2	0.16	0.13	0.01	-0.04	0.01	0.14	-0.04	1.00							
LSTsol RH3	0.53	0.53	0.61	0.52	0.51	0.52	-0.36	-0.36	1.00						
LSTsol DIA	0.77	0.76	0.71	0.59	0.64	0.76	-0.08	0.29	0.73	1.00					
LSTsombra RH1	0.45	0.44	0.46	0.10	0.09	0.33	-0.65	0.26	0.60	0.63	1.00				
LSTsombra RH2	0.42	0.42	0.43	0.17	0.16	0.34	-0.71	0.48	0.49	0.63	0.94	1.00			
LSTsombra RH3	0.28	0.28	0.36	0.09	0.07	0.19	-0.48	-0.39	0.87	0.50	0.76	0.56	1.00		
LSTsombra DIA	0.42	0.42	0.45	0.15	0.13	0.32	-0.69	0.18	0.69	0.65	0.99	0.94	0.81	1.00	
LST DIA	0.67	0.66	0.65	0.42	0.44	0.61	-0.40	0.26	0.78	0.92	0.88	0.85	0.71	0.90	
LST NOCHE	0.68	0.67	0.63	0.54	0.59	0.68	0.10	-0.01	0.82	0.94	0.48	0.40	0.59	0.52	

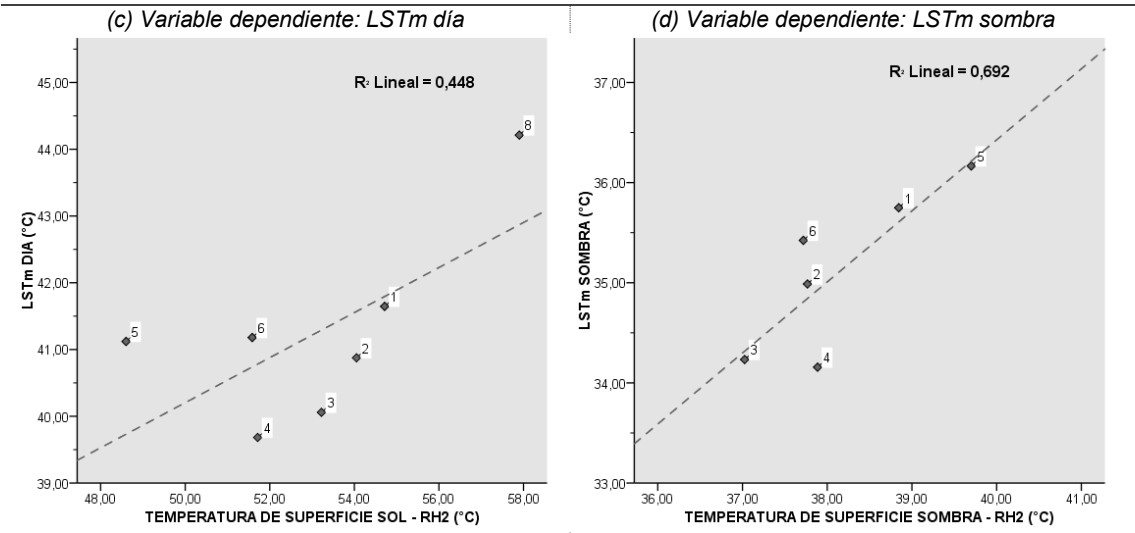
Fuente: Elaboración propia

Los modelos de dispersión del caso N°1, nos informan que la superficie expuesta al sol en por la tarde- rango horario3- explica el 40.8% de la variabilidad del LSTm de noche (figura 90, a), asimismo, el LSTm de día explica el 44.8% de su variabilidad al LST sol - rango horario 2- comparado a los otros dos rangos horarios que obtuvieron menores valores de correlación-, siendo “el asfalto color negro” el tipo de cobertura que mantiene la mayor temperatura de superficie. (figura 90, c)

Respecto al LSTm expuesto al sol y sombra, el primero explica el 70.3% de su variabilidad al LST sol-rango horario 1 y el “asfalto color negro” el tipo de cobertura que mantiene la mayor temperatura de superficie (figura 90, b); mientras que el segundo lo explica al 69.2% y atribuye al LST sombra - rango horario 2 y el “adoquín color terracota”, es el tipo de cobertura que mantiene la mayor temperatura de superficie (figura 90, d).

Figura 90: Regresión Lineal con variable independiente: LST - Caso N°1

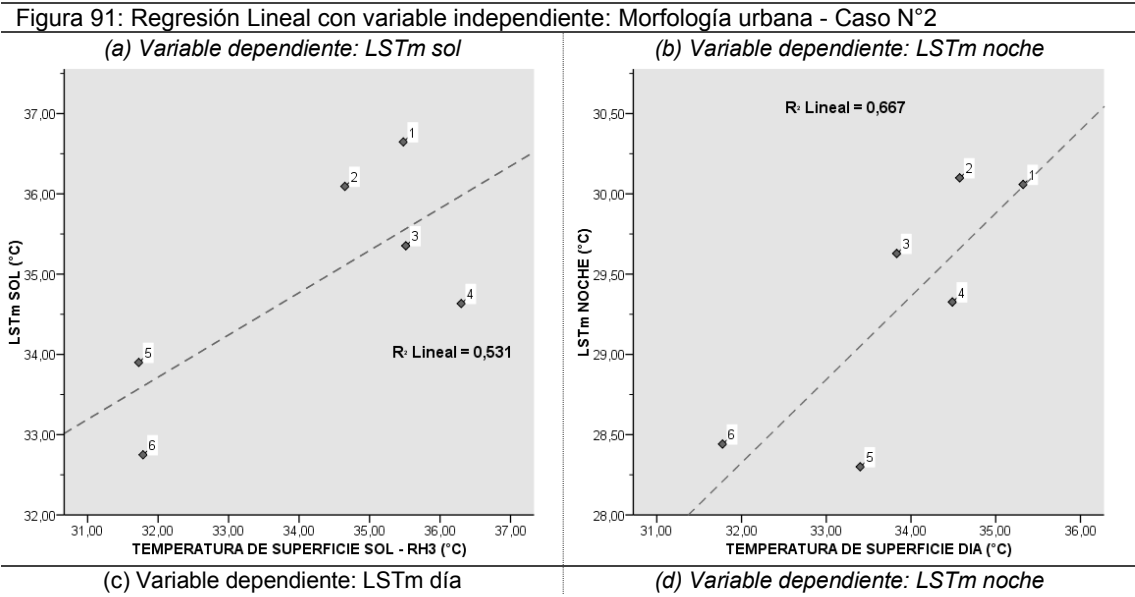


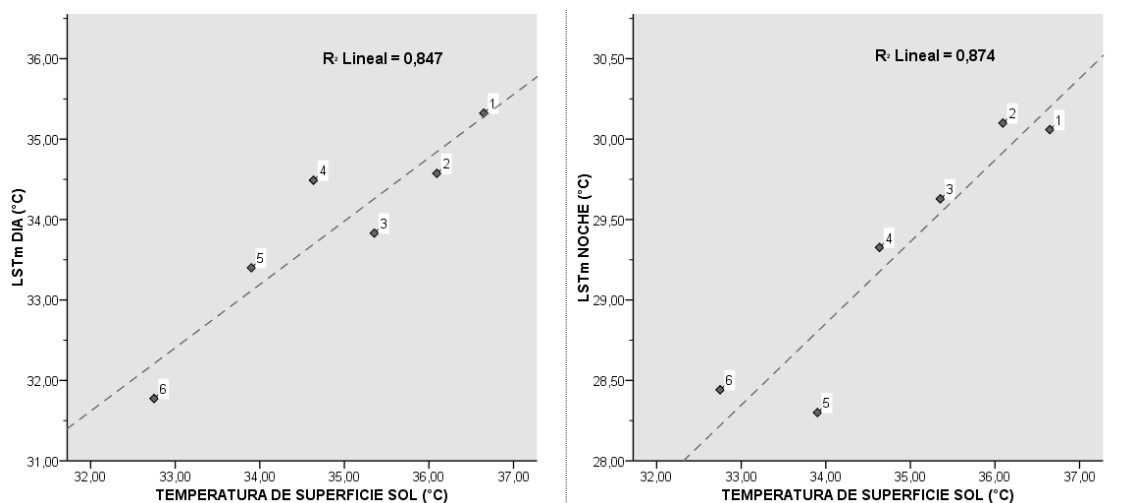


Fuente: Elaboración propia
*RH: Rango horario
**LSTm: Temperatura de superficie media
***R²: Coeficiente de determinación
****Tipología de coberturas: 1. Asfalto color negro, 2. Panot "4 tabletas", 3. Panot "La Flor", 4. Adoquín color gris, 5. Adoquín color terracota, 6. Loseta lisa, 7. Piedra de granito 8. Suelo desnudo o poca vegetación.

Los modelos de dispersión del caso N°2, nos informan que la superficie expuesta al sol por la tarde -rango horario 3- explica el 53.1% de la variabilidad del LSTm sol (figura 91, a), asimismo, el LSTm de sol explica el 84.7% de su variabilidad al LSTm día (figura 91, c). Cabe destacar, que el tipo de cobertura “Suelo desnudo o con poca vegetación” es el que registra menores temperaturas de superficie de día.

Respecto al LSTm noche, el LSTm de día explica el 66.7% de su variabilidad (figura 91, b), mientras que el LST sol, lo explica al 87.4% (figura 91, d), siendo el asfalto color negro y rojo los que registran mayores temperaturas, mientras que la arena y suelo desnudo o con poca vegetación registran las menores temperaturas.





Fuente: Elaboración propia

*RH: Rango horario

**LSTm: Temperatura de superficie media

*** R^2 : Coeficiente de determinación

**** Tipología de coberturas: 1. Asfalto color negro, 2. Asfalto color rojo, 3. Panot "4 tabletas", 4. Loseta lisa, 5. Arena, 6. Suelo desnudo o poca vegetación.

▪ Análisis de Correlación lineal por puntos de medición

La tabla 27 registra los coeficientes de relación de las variables climáticas: registrados en campo, de estaciones meteorológicas públicas y las variables morfológicas para el primer caso de estudio. En esta tabla se han seleccionado las variables cuantitativas que mayor magnitud y tendencia presentan, omitiéndose las siguientes variables climáticas registradas en campo: Humedad relativa media de día y Velocidad de viento media de noche, y como variable morfológica, a la Orientación.

A simple vista, se aprecia entre las variables climáticas registradas en campo, correlación creciente entre el *LSATm de día* y *LSAT día-rango horario 2* con valor de 0.68, *humedad relativa media de noche* y *LSAT día-rango horario 2* con valor de 0.58; respecto a las correlaciones que decrecen, entre *humedad relativa media de día* y *LSATm de día* se obtiene un valor de -0.67 (e incidiendo sobre el *LSAT día-rango horario 1* con -0.53).

Por otro lado, según los registrados por estaciones públicas, se observa una relación lineal positiva moderada entre el *LSATm de día (Zona Universitaria)* y *LSAT día-rango horario 2* con 0.49, así como con la *humedad relativa media de noche* con 0.52 y alcanza un valor fuerte de relación de 0.95 con el *LSAT de día (Estación pública El Raval)*. Respecto a la *velocidad media de viento de día* existe una relación negativa moderada de -0.56 con el *LSATm de día (Estación pública El Raval)*, mientras que la relación es aún negativa pero fuerte de -0.94 con el *LSATm de noche (Estación pública Zona universitaria)*.

Si se analiza la relación con las variables morfológicas, en general se observa correlaciones negativas y positivas débiles, entre ellas con el LST de día y noche; sin embargo, se aprecia dependencias positivas moderadas entre la *velocidad media de viento* con la *intensidad edificatoria* (valor de 0.69), con el *ancho de vía* (valor de 0.66) y con la *verticalidad* (valor de 0.62). Además, el de la *humedad relativa media de noche* con la *verticalidad* (valor de 0.48) y con el *ancho de vía* (valor de 0.48).

En este último análisis, existe grado de dependencia lineal positiva entre las variables morfológicas y climáticas, esto es, la velocidad de viento tiende a crecer conforme aumenta

la intensidad edificatoria, ancho de vía y verticalidad, mientras que la humedad relativa de noche se socia a mayor ancho de vía y verticalidad.

Tabla 27: Correlación de Pearson de variables climáticas y morfológicas - Caso N°1

	LSATm día	LSATm rh 1	LSATm rh 2	LSATm rh 3	LSATm noche	VVm día	HRm noche	LSATm día El Raval	LSATm día Z. Universitaria	LSATm noche Z. Universitaria	Intensidad edificatoria	Verticalidad	Ancho de vía
VARIABLES CLIMÁTICAS - REGISTRO EN CAMPO													
LSATm día	1.00												
LSATm rh 1	0.32	1.00											
LSATm rh 2	0.68	0.11	1.00										
LSATm rh 3	0.24	-0.09	-0.03	1.00									
LSATm noche	-0.18	0.10	-0.55	0.28	1.00								
VVm día	-0.04	0.10	-0.17	-0.04	-0.01	1.00							
HRm noche	0.16	-0.23	0.58	-0.11	-0.90	0.15	1.00						
VARIABLES CLIMÁTICAS - ESTACIÓN METEOROLÓGICA PÚBLICA													
LSATm día - El Raval	0.08	-0.24	0.41	-0.01	-0.28	-0.56	0.34	1.00					
LSATm día - Z. Universitaria	0.13	-0.22	0.49	-0.04	-0.40	-0.43	0.52	0.95	1.00				
LSATm noche - Z. Universitaria	-0.15	-0.29	0.09	0.02	-0.22	-0.94	0.23	0.82	0.76	1.00			
VARIABLES MORFOLÓGICAS													
Intensidad edificatoria	-0.08	0.00	-0.03	-0.22	-0.19	0.69	0.23	-0.52	-0.38	-0.48	1.00		
Verticalidad	0.08	0.01	0.13	-0.04	-0.34	0.62	0.48	-0.32	-0.16	-0.35	0.67	1.00	
Ancho de vía	0.04	-0.09	0.20	-0.08	-0.46	0.66	0.49	-0.49	-0.36	-0.51	0.65	0.74	1.00

Fuente: Elaboración propia

* RH: Rango horario

La tabla 28 registra los coeficientes de relación del *LST* registrados en campo y los indicadores calculados por teledetección y las variables morfológicas para el primer caso de estudio.

En esta tabla se han seleccionado las variables cuantitativas que mayor magnitud y tendencia presentan, omitiéndose las variables morfológicas: Aspect ratio y Orientación, y como indicador por teledetección, Albedo. Además, no se consideró presentar las relaciones entre el *LSAT* y *LST* porque no se consideran valores de dependencia relevantes positivos o negativos, el rango de valores alcanzado, de los últimos mencionados, es de -0.67 a 0.37.

A simple vista, respecto al *LST* registrado en campo, se aprecia correlaciones crecientes entre el *LSTm de sol* con el *LSTm de día* de valor de 0.73, y con *LST día-rango horario 1* de valor 0.72. **Por otro lado, de forma general se observa que no existen dependencias moderadas ni fuertes del *LST* registrado en campo con los indicadores por teledetección**, excepto por dos indicadores: el *LSTm de día* y *LSEm de día*. Respecto al indicador del *LSTm de día* (Landsat 8) se relaciona de forma negativa con el *LSTm de día* (registro en campo) de valor -0.60, con el *LSTm de sol* (registro en campo) de valor -0.48 y con el *LSTm de sombra* (registro en campo) de valor -0.48.

Al relacionar todos los indicadores por teledetección, el albedo no presentaba dependencia lineal positiva ni negativa significativa, caso contrario con los otros que sí presentaban relaciones positivas moderadas y fuertes. Se observa correlación positiva entre el *LSTm de día* con el *NDBIm de día* (valor de 0.57), con el *BUM de día* (0.73) y con el *IBIm de día* (valor de 0.71). Asimismo, se aprecia dependencias positivas entre el *NDBIm de día* con el *BUM de día* (valor de 0.92) y con *IBIm de día* (valor de 0.75); respecto al *BUM de día*, este se relaciona de modo fuerte con el *IBIm de día* con valor de 0.94.

Sin embargo, sucede todo lo contrario con el *LSEm de día*, que se observa dependencias negativas fuertes respecto al *LSTm de día* (valor de -0.78), al *NDBIm de día* (valor de -0.67), al *BUM de día* (valor de 0.72) y al *IBIm de día* (valor de -0.63).

Si se analiza la relación con las variables morfológicas, respecto a la intensidad edificatoria se aprecia una dependencia positiva moderada con el *LSTm de día* (registro en campo) de valor de 0.58, mientras es negativo con el *LSTm de día* (Landsat 8) de valor -0.59 y con el *BUM de día* (Landsat 8) de valor -0.57. El *LST día-rango horario 2* (registro en campo), se relaciona de forma positiva con el *ancho de vía* (valor de 0.75) pero negativa con el *aspect ratio* (valor de -0.60); mientras el *LSTm de noche* presenta dependencia moderada con la *verticalidad* de valor 0.47, con el *ancho de vía* de valor 0.48 y con el *aspect ratio* de valor negativo -0.46.

En este último análisis, existe grado de dependencia lineal positiva y negativa entre las variables morfológicas, indicadores de teledetección y el *LST*; esto es, el *LSTm de día* (registro en campo) tiende a crecer conforme aumenta la intensidad edificatoria, el *LSTm* en el pico más alto del día se asocia a mayor ancho de vía, pero a menor *aspect ratio*, mientras que el *LSTm de día* (Landsat-8) tiende a crecer conforme disminuye la intensidad edificatoria.

Tabla 28: Correlación de Pearson de *LST*, indicadores de Landsat 8 y variables morfológicas - Caso N°1

	<i>LSTm día</i>	<i>LSTm rh 1</i>	<i>LSTm rh 2</i>	<i>LSTm rh 3</i>	<i>LSTm sol</i>	<i>LSTm sombra</i>	<i>LSTm noche</i>	<i>LSTm día Landsat 8</i>	<i>NDBIm Landsat 8</i>	<i>BUM Landsat 8</i>	<i>IBIm Landsat 8</i>	<i>LSEm Landsat 8</i>	Intensidad edificatoria	Verticalidad	Ancho de vía
TEMPERATURA DE SUPERFICIE - REGISTRO EN CAMPO															
<i>LSTm día</i>	1.00														
<i>LSTm rh 1</i>	0.65	1.00													
<i>LSTm rh 2</i>	0.35	0.02	1.00												
<i>LSTm rh 3</i>	0.11	-0.07	0.64	1.00											
<i>LSTm sol</i>	0.86	0.72	0.22	0.09	1.00										
<i>LSTm sombra</i>	0.73	0.27	0.36	0.09	0.29	1.00									
<i>LSTm noche</i>	0.01	-0.12	0.38	0.50	-0.14	0.19	1.00								
INDICADORES - LANDSAT 8															
<i>LSTm día</i>	-0.60	-0.24	-0.34	-0.37	-0.48	-0.48	-0.08	1.00							
<i>NDBIm día</i>	-0.29	-0.13	-0.38	-0.35	-0.29	-0.16	-0.20	0.57	1.00						
<i>BUM día</i>	-0.31	-0.17	-0.30	-0.33	-0.37	-0.10	-0.13	0.73	0.92	1.00					
<i>IBIm día</i>	-0.20	-0.13	-0.14	-0.24	-0.32	0.05	-0.03	0.71	0.75	0.94	1.00				
<i>LSEm día</i>	0.49	0.13	0.19	0.12	0.39	0.40	-0.04	-0.78	-0.67	-0.72	-0.63	1.00			
VARIABLES MORFOLÓGICAS															
Intensidad edificatoria	0.58	0.10	0.35	0.17	0.51	0.40	0.03	-0.59	-0.49	-0.57	-0.47	0.63	1.00		
Verticalidad	0.34	-0.06	0.51	0.41	0.27	0.28	0.47	-0.43	-0.62	-0.54	-0.36	0.46	0.67	1.00	
Ancho de vía	0.42	0.04	0.75	0.62	0.42	0.24	0.48	-0.41	-0.53	-0.53	-0.37	0.35	0.65	0.74	1.00

Fuente: Elaboración propia

La tabla 29 registra los coeficientes de relación de las variables climáticas (registrados en campo y de estaciones públicas) y las variables morfológicas para el segundo caso de estudio. En esta tabla se han seleccionado las variables cuantitativas que mayor magnitud y tendencia presentan, omitiéndose las variables climáticas: humedad relativa media de noche y velocidad media de viento de noche (ambos registrados en campo), el *LSATm* de noche registrado la estación El Raval y el *aspect ratio* como variable morfológica.

A simple vista, respecto a las variables climáticas, se aprecia pocas correlaciones crecientes moderadas o fuertes, pero entre el *LSATm de día* con el *LSAT día-rango horario 1* se obtiene un valor de relación de 0.73, y con el *LSAT día-rango horario 2* un valor de 0.54. La *humedad relativa media de día* no se asocia positivamente al *LSAT día-rango horario 1* con valor de -0.65 y menos al *LSAT día-rango horario 2* con valor de -0.53.

Por otro lado, de forma general se observa que no existen dependencias moderadas ni fuertes del *LSAT* media de día y noche de las estaciones públicas con las variables climáticas registrados en campo, excepto por el *LSATm de noche* de la estación El Raval que se relaciona de forma positiva y moderada con la *humedad relativa media de día* (registro en campo) de valor 0.67.

Si se analiza la relación entre las variables climáticas con las variables morfológicas, se aprecia dos valores positivos de moderada relación y son resultados de las relaciones de la *velocidad media de viento de día* con la *verticalidad* (valor de 0.57) y con la *orientación* (valor de 0.56). Cabe resaltar además que las demás relaciones no son significantes para la presente investigación.

En este último análisis, existe grado de dependencia lineal positiva y negativa entre las variables morfológicas y las climáticas; esto es, el *LSTm de día* tiende a crecer conforme aumenta la principalmente al *LSATm en la mañana* y luego según aumenta el *LSAT media en el pico más alto del día*, la velocidad media de viento de día se asocia a mayor verticalidad y a la orientación.

Tabla 29: Correlación de Pearson de variables climáticas y morfológicas - Caso N°2

	<i>LSATm día</i>	<i>LSATm rh 1</i>	<i>LSATm rh 2</i>	<i>LSATm rh 3</i>	<i>LSATm noche</i>	<i>HRm día</i>	<i>VVm día</i>	<i>LSATm día El Raval</i>	<i>LSATm día Zoo</i>	<i>LSATm noche Zoo</i>	<i>Verticalidad</i>	<i>Ancho de vía</i>	<i>Orientación</i>
VARIABLES CLIMÁTICAS - REGISTRO EN CAMPO													
<i>LSATm día</i>	1.00												
<i>LSATm rh 1</i>	0.73	1.00											
<i>LSATm rh 2</i>	0.54	-0.09	1.00										
<i>LSATm rh 3</i>	0.46	-0.09	0.38	1.00									
<i>LSATm noche</i>	0.43	0.48	0.24	-0.19	1.00								
<i>HRm día</i>	-0.39	-0.65	-0.53	-0.49	-0.48	1.00							
<i>VVm día</i>	-0.62	-0.34	-0.46	-0.37	-0.14	0.46	1.00						
VARIABLES CLIMÁTICAS - ESTACIÓN METEOROLÓGICA PÚBLICA													
<i>LSATm día - El Raval</i>	0.18	0.11	0.16	0.04	0.41	-0.31	0.08	1.00					
<i>LSATm día - Zoo</i>	0.26	0.19	0.25	-0.01	0.32	-0.38	0.04	0.93	1.00				
<i>LSATm noche - Zoo</i>	-0.52	-0.38	-0.45	0.01	-0.41	0.67	0.06	-0.39	-0.61	1.00			
VARIABLES MORFOLÓGICAS													
<i>Verticalidad</i>	-0.21	0.12	-0.23	0.57	0.12	0.11	0.57	-0.03	0.04	-0.34	1.00		
<i>Ancho de vía</i>	0.10	0.26	-0.01	-0.31	0.01	-0.04	0.02	-0.31	-0.29	-0.11	0.64	1.00	
<i>Orientación</i>	-0.30	-0.21	-0.23	-0.07	-0.48	0.22	0.56	-0.01	0.07	-0.09	0.26	-0.08	1.00

Fuente: Elaboración propia

La tabla 30 registra los coeficientes de relación del *LSAT* y *LST* durante el día y noche, y las variables morfológicas para el segundo caso de estudio. En esta tabla se han seleccionado las variables cuantitativas que mayor magnitud y tendencia presentan, omitiéndose el *LSATm de día* y el *LSAT día-rango horario 1*, de las variables morfológicas: el aspect ratio y orientación.

A simple vista, respecto a las relaciones entre el *LSAT* y *LST*, se aprecian varias correlaciones crecientes moderadas y sólo se describen las más relevantes como la relación entre el *LSATm de noche* con *LST día-rango horario 1* que obtiene un valor de relación de 0.59, el *LSAT día-rango horario 2* con el *LSTm de sol* con valor de 0.60 y el *LSAT día-rango horario 2* con el *LSTm sol* con valor de 0.55. Por otro lado, respecto a las relaciones de distintos registros del *LST* (registros en campo), es interesante detallar la correlación fuerte y positiva del *LSTm de día* con el *LST día-rango horario 2* con un valor de 0.72, mientras que el *LSTm de noche* se relaciona más con el *LST día-rango horario 3* con valor de 0.84.

Si se analiza la relación entre el *LST* con las variables morfológicas, se aprecia cuatro valores positivos de moderada relación y son resultados de las relaciones del *LSTm de día* con la intensidad edificatoria (valor de 0.58), y el *LST día-rango horario 1* se relaciona principalmente con la intensidad edificatoria (valor de 0.62) y con la verticalidad (valor de 0.50), mientras que el *LSTm de noche* tiende a ser positiva respecto a la intensidad edificatoria (valor de 0.64).

En resumen, existe grado de dependencia lineal positiva entre las variables morfológicas y el *LST*; esto es, el *LSTm de día* y *noche* tienden a crecer conforme aumenta la intensidad edificatoria y el *LSTm en la mañana* se asocia a la intensidad edificatoria como a la verticalidad (en ese orden de relación).

Tabla 30: Correlación de Pearson de *LSAT*, *LST* y variables morfológicas - Caso N°2

	<i>LSATm rh 2</i>	<i>LSATm rh 3</i>	<i>LSATm noche</i>	<i>LSTm día</i>	<i>LSTm rh 1</i>	<i>LSTm rh 2</i>	<i>LSTm rh 3</i>	<i>LSTm sol</i>	<i>LSTm sombra</i>	<i>LSTm noche</i>	Intensidad edificatoria	Verticalidad	Ancho de vía
TEMPERATURA DE AIRE - REGISTRO EN CAMPO													
<i>LSATm rh 2</i>	1.00												
<i>LSATm rh 3</i>	0.38	1.00											
<i>LSATm noche</i>	0.24	-0.19	1.00										
TEMPERATURA DE SUPERFICIE - REGISTRO EN CAMPO													
<i>LSTm día</i>	0.47	0.21	0.09	1.00									
<i>LSTm rh 1</i>	0.49	-0.01	0.59	0.47	1.00								
<i>LSTm rh 2</i>	0.16	-0.15	0.06	0.72	0.07	1.00							
<i>LSTm rh 3</i>	0.17	0.60	-0.45	0.41	-0.26	0.15	1.00						
<i>LSTm sol</i>	0.55	0.40	0.09	0.86	0.58	0.46	0.45	1.00					
<i>LSTm sombra</i>	0.19	-0.11	0.05	0.79	0.16	0.77	0.20	0.37	1.00				
<i>LSTm noche</i>	0.34	0.42	-0.22	0.27	-0.20	0.14	0.84	0.36	0.05	1.00			
VARIABLES MORFOLÓGICAS													
Intensidad edificatoria	0.42	-0.22	0.28	0.58	0.62	0.29	-0.13	0.35	0.64	-0.23	1.00		
Verticalidad	-0.23	-0.57	0.12	0.27	0.50	0.19	-0.37	0.21	0.24	-0.51	0.48	1.00	
Ancho de vía	-0.01	-0.31	0.01	0.25	0.42	0.19	-0.43	0.32	0.07	-0.44	0.17	0.64	1.00

Fuente: Elaboración propia

La tabla 31 registra los coeficientes de relación del *LST* registrados en campo y los indicadores calculados por teledetección y las variables morfológicas para el segundo caso de estudio. En esta tabla se han seleccionado las variables cuantitativas que mayor magnitud y tendencia presentan, omitiéndose las variables morfológicas: *Orientación*, y respecto al *LST* registrados en campo, los *LST día-rango horario 1*, el *LST día-rango horario 3* y el *LSTm sombra*. Además, si bien otra vez se observan relaciones ente el *LST* y las variables morfológicas, éstas ya se describen previamente (tabla 30). La idea es considerar dos grandes relaciones: entre los indicadores por teledetección y el *LST* registrados en campo, y entre variables morfológicas y los indicadores por teledetección.

A simple vista, respecto al LST registrado en campo, se aprecia correlaciones decrecientes moderadas entre el *LSTm día* con el *NDBIm de día* de valor -0.62, y con el *BUM de día* de valor -0.58. Del mismo modo de correlaciones, sucede entre el *LST día-rango horario 2* con el *NDBIm de día* de valor -0.57, y con el *BUM de día* de valor -0.61. Como también entre el *LSTm sol* con el *NDBIm de día* de valor -0.58, y con el *BUM de día* de valor -0.57. Todo lo contrario, sucede con el *LSTm de noche* que se relaciona de modo positivo con el *Albedo de día* de valor 0.53.

Al relacionar todos los indicadores por teledetección, se observa correlación positiva entre el *LSTm de día* con el *NDBIm de día* (valor de 0.57), con el *BUM de día* (0.55). Asimismo, se aprecia dependencias positivas entre el *NDBIm de día* con el *BUM de día* (valor de 0.96) y con *IBIm de día* (valor de 0.79); respecto al *BUM de día*, este se relaciona de modo fuerte y positivo con el *IBIm de día* con valor de 0.93 y con el *IBIm de día* (valor de 0.93). Sin embargo, sucede todo lo contrario con el *LSEm de día*, que se observa dependencias negativas fuertes respecto al *LSTm de día* (valor de -0.67), al *NDBIm de día* (valor de -0.69), al *BUM de día* (valor de 0.79) y al *IBIm de día* (valor de -0.78).

Si se analiza con la relación con las variables morfológicas, respecto a la *intensidad edificatoria* se aprecia una dependencia moderada negativa con el *albedo* de valor -0.58. El *ancho de vía* se relaciona de modo negativo con el *NDBIm de día* de valor -0.60, con el *BUM de día* de valor -0.70 y con el *IBIm de día* de valor de -0.74. Mientras que el *aspect ratio* se relaciona, pero de forma positiva moderada con el *NDVIm de día* de valor 0.55, con el *BUM de día* de valor 0.67 y con el *IBIm de día* de valor 0.76.

En este último análisis, existe grado de dependencia lineal positiva y negativa entre las variables morfológicas, indicadores de teledetección y LST; esto es, el *NDBIm de día*, *Bum de día* y el *IBIm de día* (Landsat 8) tienden a aumentar conforme se reduce el *ancho de vía* pero si aumenta el *aspect ratio*, el *BUM de día* en el pico más alto del día se asocia a mayor *ancho de vía*, pero a menor *aspect ratio*, mientras que el *LSTm de día* (Landsat 8) tiende a crecer conforme disminuye la *intensidad edificatoria*. Por otro lado, el *albedo* de día tiende a aumentar conforme se reduce la *intensidad edificatoria*.

Tabla 31: Correlación de Pearson de LST, indicadores de Landsat 8 y variables morfológicas - Caso N°2

	<i>LSTm día</i>	<i>LSTm rh 2</i>	<i>LSTm sol</i>	<i>LSTm noche</i>	<i>LSTm día Landsat 8</i>	<i>NDBIm Landsat 8</i>	<i>BUM Landsat 8</i>	<i>IBIm Landsat 8</i>	<i>LSEm Landsat 8</i>	<i>ALBEDOm Landsat 8</i>	<i>Intensidad edificatoria</i>	<i>Verticalidad</i>	<i>Ancho de vía</i>	<i>Aspect ratio</i>
TEMPERATURA DE SUPERFICIE - REGISTRO EN CAMPO														
<i>LSTm día</i>	1.00													
<i>LSTm rh 2</i>	0.72	1.00												
<i>LSTm sol</i>	0.86	0.46	1.00											
<i>LSTm noche</i>	0.27	0.14	0.36	1.00										
INDICADORES- LANDSAT 8														
<i>LSTm día</i>	-0.10	-0.19	-0.30	-0.15	1.00									
<i>NDBIm día</i>	-0.62	-0.57	-0.58	-0.15	0.57	1.00								
<i>BUM día</i>	-0.58	-0.61	-0.57	-0.05	0.55	0.96	1.00							
<i>IBIm día</i>	-0.42	-0.55	-0.43	0.09	0.42	0.79	0.93	1.00						
<i>LSEm día</i>	0.32	0.40	0.47	0.17	-0.67	-0.69	-0.79	-0.78	1.00					
<i>ALBEDOm día</i>	0.06	0.09	0.33	0.53	-0.39	-0.21	-0.22	-0.18	0.60	1.00				
VARIABLES MORFOLÓGICAS														
<i>Intensidad edificatoria</i>	0.58	0.29	0.35	-0.23	0.10	-0.18	-0.06	0.15	-0.36	-0.58	1.00			
<i>Verticalidad</i>	0.27	0.19	0.21	-0.51	-0.26	-0.42	-0.40	-0.31	0.13	-0.25	0.48	1.00		
<i>Ancho de vía</i>	0.25	0.19	0.32	-0.44	-0.35	-0.60	-0.70	-0.74	0.43	-0.14	0.17	0.64	1.00	
<i>Aspect ratio</i>	-0.14	-0.14	-0.25	0.18	0.30	0.55	0.67	0.76	-0.49	0.00	0.11	-0.18	-0.86	1.00

Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla presenta el resumen de las correlaciones más altas alcanzadas entre las variables climáticas registradas en campo e indicadores por teledetección respecto a las variables morfológicas, y mediante los modelos de regresión lineal simple se trata de demostrar la proporción de variabilidad (coeficiente de terminación - R^2) de datos de las variables mencionadas.

Tabla 32: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según la variable morfológica - Caso N°1

VARIABLES MORFOLÓGICAS	VARIABLES CLIMATICAS - REGISTRO EN CAMPO							INDICADOR DE LANDSAT 8			
	VVm día	HRm noche	LSTm día	LSTm rh 2	LSTm rh 3	LSTm sol	LSTm noche	LSTm	NDBIm	BUm	ALBEDO m
Intensidad edificatoria	0.69		0.58			0.51		-0.59		-0.57	-0.52
Verticalidad	0.62	0.48		0.51			0.47		-0.62	-0.54	-0.63
Ancho de vía	0.66	0.49		0.75	0.62		0.48		-0.53	-0.53	-0.53
Aspect ratio				-0.60	-0.66						

Fuente: Elaboración propia

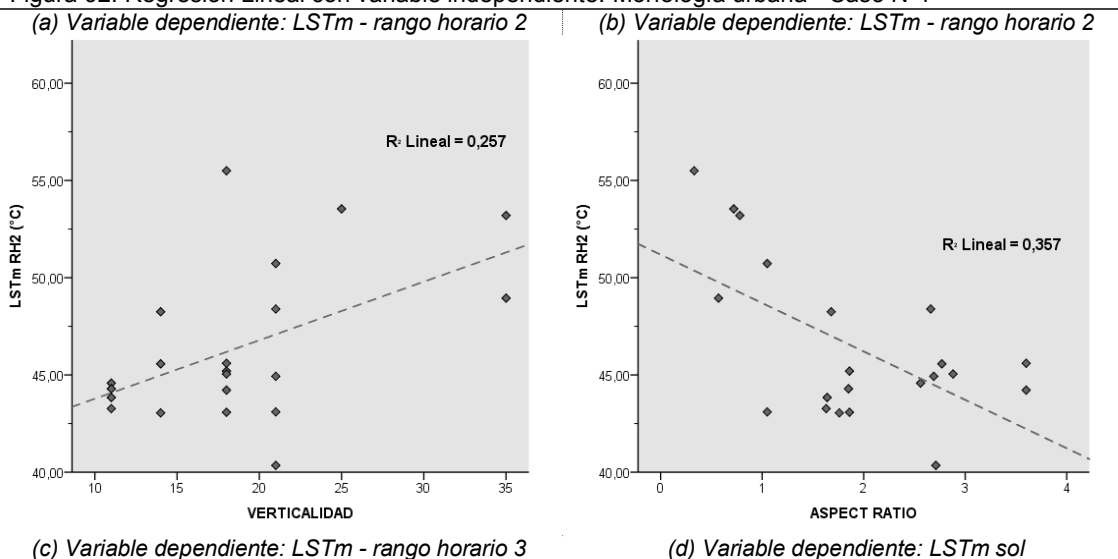
Por lo tanto, los modelos nos informan que la temperatura de superficie en el pico más alto del día -LSTm rango horario 2- se explica al 25.7% por la verticalidad de las edificaciones (figura 92, a), mientras que el aspect ratio lo explica al 35.7% (figura 92, b).

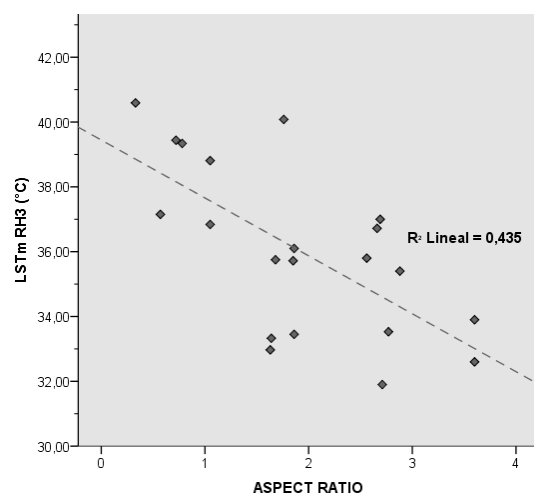
Por la tarde, la temperatura de superficie -LSTm rango horario 3- explica el 43.6% de su variabilidad al aspect ratio (figura 92, c).

Asimismo, se obtiene que la intensidad edificatoria sólo explica el 26.3% de la variabilidad de la temperatura de superficie en el día expuesta al sol - LSTm sol- (figura 92, d)

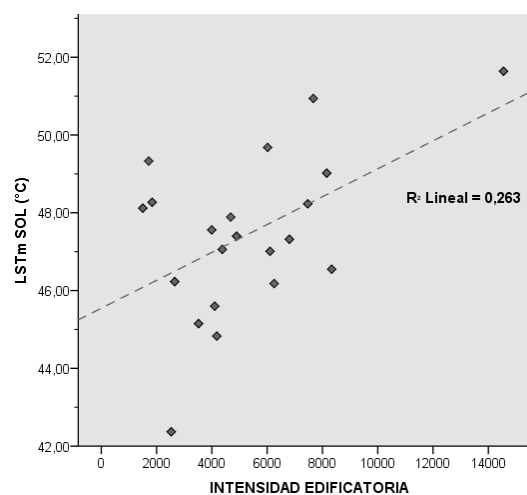
Por otra parte, se informa que la intensidad edificatoria explica el 33.3% de la variabilidad de la temperatura de superficie de día -LSTm día- registrada en campo (gráfico 80, e), mientras que esta misma variable morfológica explica el 34.8% la variabilidad de la temperatura de superficie de día, pero obtenida por teledetección. (figura 92, f)

Figura 92: Regresión Lineal con variable independiente: Morfología urbana - Caso N°1

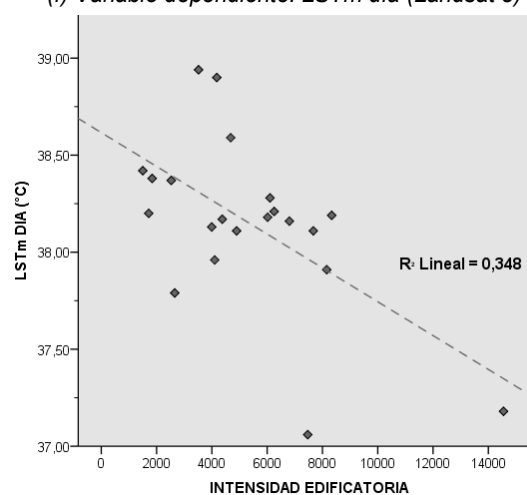
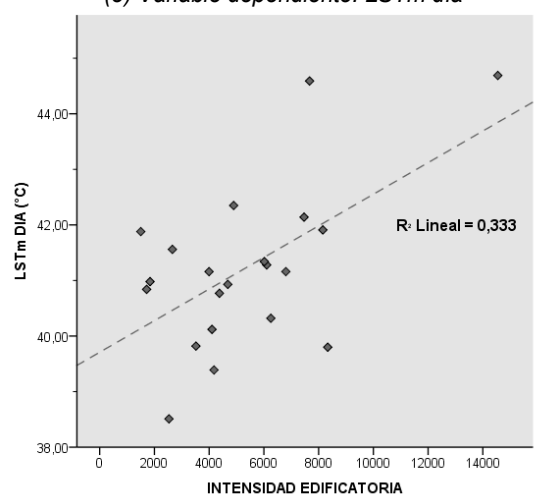




(e) Variable dependiente: LSTm día



(f) Variable dependiente: LSTm día (Landsat 8)



Fuente: Elaboración propia

* RH: Rango horario

**LSTm: Temperatura de superficie media

***R²: Coeficiente de determinación

Las siguientes tablas presentan el resumen de las correlaciones más altas alcanzadas: entre las variables climáticas registradas en campo e indicadores por teledetección respecto a las variables morfológicas (tabla 33), y entre el LSAT y LST (tabla 34); mediante los modelos de regresión lineal simple se trata de demostrar la proporción de variabilidad (coeficiente de terminación - R^2) de datos de las variables mencionadas.

Tabla 33: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según la variable morfológica - Caso N°2

VARIABLES MORFOLÓGICAS	VARIABLES CLIMATICAS - REGISTRO EN CAMPO					INDICADORES DE LANDSAT 8			
	LSAT m rh3	VVm día	LSTm día	LSTm rh 1	LSTm sombra	NDBIm	BUM	IBIm	ALBEDOm
Intensidad edificatoria			0.58	0.62	0.64				
Verticalidad	-0.57	0.57		0.50					
Ancho de vía						-0.60	-0.70	-0.74	
Aspect ratio						0.55	0.67	0.76	
Orientación		0.56				-0.51	-0.31		

Fuente: Elaboración propia

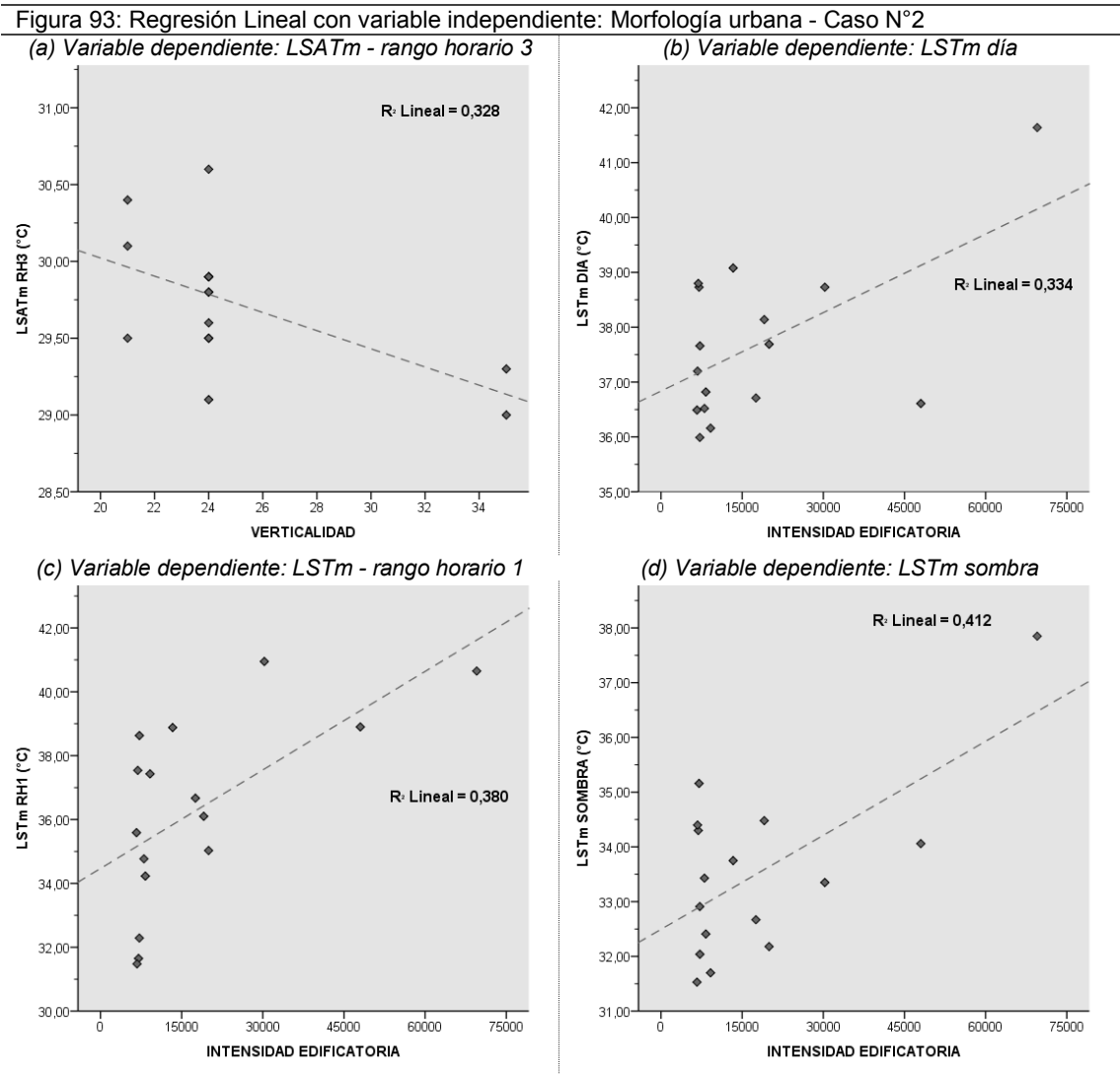
Tabla 34: Coeficientes con mayor correlación de Pearson según el LSAT - Caso N°2			
LSAT y LST - REGISTRO EN CAMPO	LSATm rango horario 2	LSATm rango horario 3	LSATm noche
LSTm rango horario 1			0.59
LSTm rango horario 3		0.60	
LSTm sol	0.55		

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, los modelos nos informan que la temperatura de aire por la tarde -LSTm rango horario 3- explica el 32.8% de su variabilidad a la verticalidad de las edificaciones (figura 93, a).

La intensidad edificatoria explica la variabilidad de la temperatura de superficie de día -LSTm día- al 33.4% (figura 93, b), mientras que informa mayor explicación -al 38%- a la variabilidad de la temperatura de superficie registrado en la mañana -LSTm rango horario1-. (figura 93, c)

Por otra parte, se informa que la intensidad edificatoria explica el 41.2% de la variabilidad de la temperatura de superficie expuesta a la sombra -LSTm sombra- registrada en campo (figura 93, d).



Fuente: Elaboración propia

* RH: Rango horario

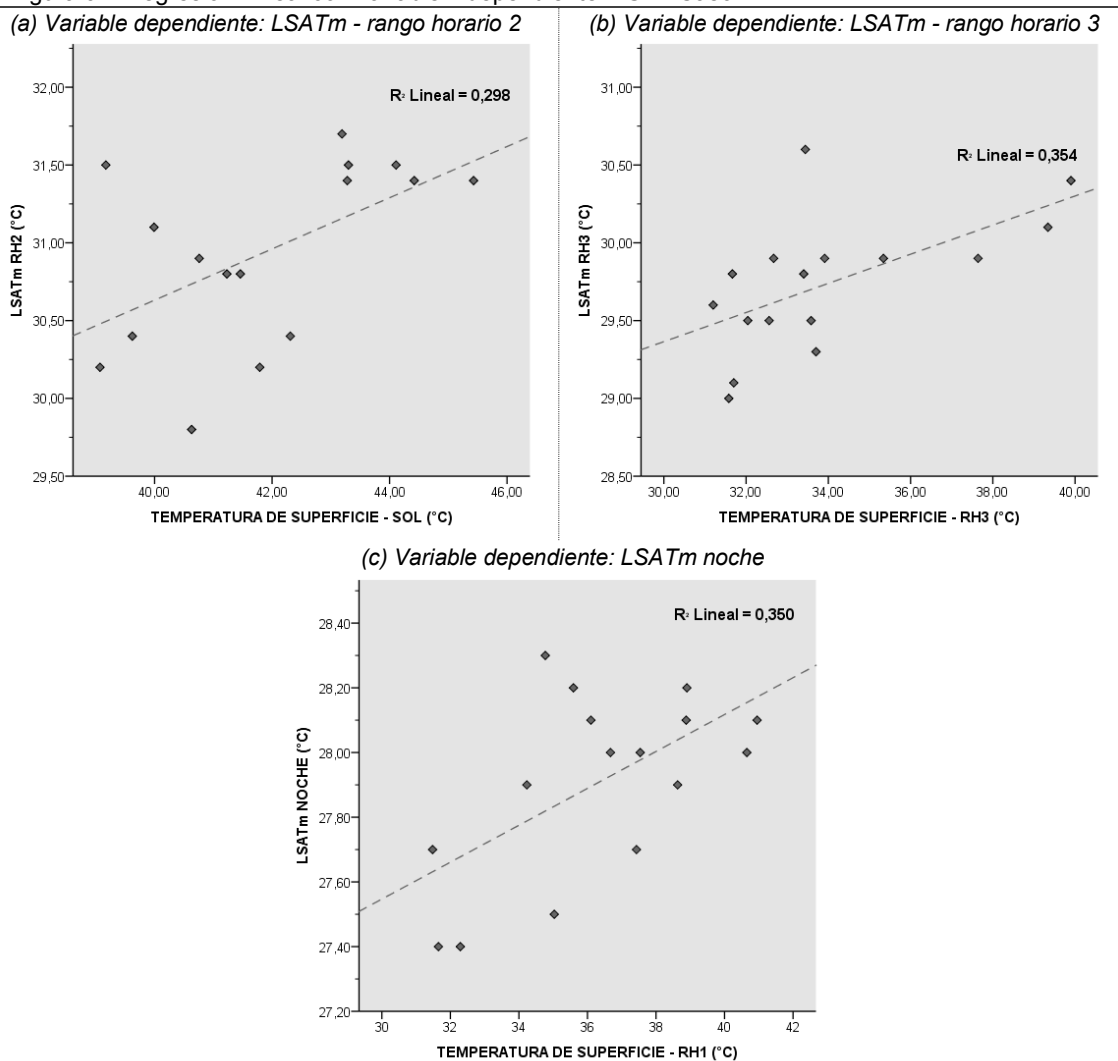
**LSTm: Temperatura de superficie media

***R²: Coeficiente de determinación

Por lo tanto, los modelos nos informan que la temperatura de aire en el pico más alto del día -LSATm rango horario 2- explica el 29.8% de su variabilidad a la a la temperatura de superficie expuesto al sol -LSTm sol- (figura 94, a). Mientras, que por la tarde la temperatura de aire -LSATm rango horario 3- explica el 35.4% de su variabilidad a la a la temperatura de superficie -LSTm rango horario 3-. (figura 94, b).

Por otra parte, la temperatura de aire por la noche -LSATm noche- explica el 35% de su variabilidad a la temperatura de superficie registrada en la mañana -LSTm rango horario1- (figura 94, c).

Figura 94: Regresión Lineal con variable independiente: LST - Caso N°2



Fuente: Elaboración propia

* RH: Rango horario

**LSTm: Temperatura de superficie media / LSATm: Temperatura de aire media

****R²: Coeficiente de determinación

CONCLUSIONES

La presente investigación se desarrolla en base a ciertos cuestionamientos iniciales, y mediante la presentación de conclusiones generales y específicas, se pretenden dar respuesta -de la forma más concisa y clara-; por otra parte, se presentan observaciones y limitantes encontradas en el proceso metodológico que podrían considerarse en otras investigaciones, así como recomendaciones.

Estos cuestionamientos iniciales se configuran en la hipótesis respecto a que *la morfología y estructura urbana particulares de la ciudad de Barcelona, influyen directamente y de forma moderada en el comportamiento térmico de espacios públicos, mientras que el LST actúa indirectamente sobre el LSAT, su influencia no es tan significativa*. Asimismo, que, *en dos contextos urbanos específicos de variables físicas diferentes de la ciudad de Barcelona, se alcanza mayores diferencias térmicas en el LST que en el LSAT*.

Es así como, que se plantea el objetivo general de *determinar y cuantificar la incidencia de la radiación solar directa e indirecta sobre las coberturas en superficies horizontales, y la aportación de éstas al LSAT en dos escenarios de distinta morfología urbana*; y es a través de sus nueve objetivos específicos que permiten obtenerse resultados e información para corroborar la hipótesis planteada.

Si bien se plantea dos relaciones muy claras, entre “morfología y estructura urbana” con “clima urbano”, es necesario el estudio de dos variables que atiendan las relaciones anteriores. Para la primera variable se aborda: la intensidad edificatoria, verticalidad, ancho de vía, *aspect ratio* y orientación, mientras que para la segunda: *LSAT*, *LST*, humedad relativa y velocidad de viento. La información de apoyo que se usa como referencia, es la registradas en estaciones meteorológicas próximas e indicadores calculados mediante teledetección (*LST*, *NDBI*, *IBI*, *BU*, *LSE* y Albedo).

Por lo tanto, respecto a la principal inquietud: ***¿Cuánto y cuál es la influencia, en el comportamiento térmico en espacios públicos, la morfología y estructura urbana particulares de la ciudad de Barcelona? En el mismo sentido ¿Cuál es la actuación del LST sobre el LSAT?***

Los dos casos de estudio elegidos en el ámbito de Barcelona -ubicados en Sants y Sant Martí de Provençals-, presentan características físicas de la estructura urbana diferentes como en intensidad edificatoria, verticalidad, compacidad, principalmente.

Por lo que, al haber analizado las relaciones de las variables morfológicas con: las variables climáticas registrados en campo y con los indicadores calculados mediante teledetección, con los modelos de correlación de Pearson se indican que no existe relaciones determinantes entre el *LSAT* con las variables morfológicas tanto en Sants como en Sant Martí de Provençals. A excepción de las siguientes variables climáticas: la velocidad de viento (de día) y la humedad relativa (de noche) son las que se aparejan moderadamente a la estructura urbana de Sants -en intensidad edificatoria, verticalidad y ancho de vía-. Por su parte, el *LSAT* (del rango horario 3) y a la velocidad de viento (de día), del mismo modo se relacionan con la estructura urbana de Sant Martí de Provençals -en verticalidad y orientación-. (tabla 35)

Por otra parte, en general, el *LST* en Sants está más relacionada a las variables morfológicas, a excepción de la variable de orientación, obteniendo la mayor dependencia específicamente entre el *LST* registrado en el pico más alto del día (rango horario 2) con el ancho de vía. Mientras que en Sant Martí de Provençals, el *LST* registrado horas de la mañana (rango horario 1) y el *LST* expuesto a la sombra tienen

mayor dependencia sólo a la intensidad edificatoria. (tabla 35) Tabla 35: Correlación de Pearson entre variables de morfología y del clima urbano -LST y LSAT-

Variables climáticas/ morfológicas	Intensidad de edificatoria	Verticalidad	Ancho de vía	Aspect ratio	Orientación
CASO N°1					
LSAT					
LSATm día	-0.08	0.08	0.04	0.03	-0.18
LSATm - RH1	0.00	0.01	-0.09	0.08	-0.01
LSATm - RH2	-0.03	0.13	0.20	-0.13	-0.29
LSATm - RH3	-0.22	-0.04	-0.08	0.15	0.00
LSATm noche	-0.19	-0.34	-0.46	0.39	0.16
LST					
LSTm día	0.58	0.34	0.42	-0.25	-0.34
LSTm - RH1	0.10	-0.06	0.04	-0.14	-0.13
LSTm - RH2	0.35	0.51	0.75	-0.60	-0.23
LSTm - RH3	0.17	0.41	0.62	-0.66	0.19
LSTm sol	0.51	0.27	0.42	-0.30	-0.32
LSTm sombra	0.40	0.28	0.24	-0.07	-0.22
LSTm noche	0.03	0.47	0.48	-0.46	0.24
LSTm día Landsat 8	-0.59	-0.43	-0.41	0.15	0.07
CASO N°2					
LSAT					
LSATm día	0.25	-0.21	0.10	-0.15	-0.30
LSATm - RH1	0.16	0.12	0.26	-0.16	-0.21
LSATm - RH2	0.42	-0.23	-0.01	-0.09	-0.23
LSATm - RH3	-0.22	0.57	-0.31	0.06	-0.07
LSATm noche	0.28	0.12	0.01	0.16	-0.48
LST					
LSTm día	0.58	0.27	0.25	-0.14	0.31
LSTm - RH1	0.62	0.50	0.42	-0.14	-0.25
LSTm - RH2	0.29	0.19	0.19	-0.14	0.15
LSTm - RH3	-0.13	-0.37	-0.43	0.27	0.47
LSTm sol	0.35	0.21	0.32	-0.25	0.15
LSTm sombra	0.64	0.24	0.07	0.04	0.39
LSTm noche	-0.23	-0.51	-0.44	0.18	0.17
LSTm día Landsat 8	0.10	-0.26	-0.35	0.30	-0.09

Fuente: Elaboración propia

*El color amarillo claro indica relación moderada, y el color amarillo intenso, relación fuerte.

Si bien se señalade la influencia térmica indirecta del LST sobre el LSAT (Ayuntamiento de Barcelona, 2015), los resultados indican que tal influencia es débil para el de Caso de Sants, mientras que en Sant Martí de Provençals se registra una influencia moderada, específicamente en las siguientes horas del día: Una relación muy estrecha entre el LSAT y LST en la tarde (rango horario 3), el LSAT de noche con el LST de la mañana. Esta relación podría suponer cierta dependencia entre temperaturas –aire y superficie- a pesar de la diferencia de horas.

Tabla 36: Correlación de Pearson entre LST y LSAT

Variables climáticas	LSATm día	LSATm - RH1	LSATm - RH2	LSATm - RH3	LSATm noche
CASO N°1					
LSTm día	-0.20	-0.32	0.16	-0.24	-0.16
LSTm - RH1	-0.20	-0.16	-0.10	-0.09	0.01
LSTm - RH2	-0.02	-0.25	0.24	0.00	-0.52
LSTm - RH3	0.13	-0.14	0.37	0.01	-0.67
LSTm sol	-0.11	-0.17	0.07	-0.09	-0.05
LSTm sombra	-0.23	-0.38	0.22	-0.32	-0.23
LSTm noche	-0.17	-0.33	0.04	0.11	-0.18
LSTm día Landsat 8	0.25	0.35	-0.17	0.34	0.42
CASO N°2					
LSTm día	0.31	0.02	0.47	0.21	0.09
LSTm - RH1	0.44	0.27	0.49	-0.01	0.59
LSTm - RH2	0.09	0.08	0.16	-0.15	0.06
LSTm - RH3	-0.07	-0.45	0.17	0.60	-0.45
LSTm sol	0.40	-0.01	0.55	0.40	0.09
LSTm sombra	0.09	0.04	0.19	-0.11	0.05
LSTm noche	-0.10	-0.50	0.34	0.42	-0.22
LSTm día Landsat 8	0.02	-0.06	-0.02	0.20	0.06

Fuente: Elaboración propia

Y la segunda inquietud: **¿Cuál y cuánto es la incidencia de la diferencia térmica del LST comparado al LSAT en espacios públicos de dos casos de estudio de la ciudad de Barcelona?**

Una vez calculados los valores medios del LSAT y LST de día y noche, con datos registrados en campo durante 4 rangos horarios y con efectos de sol y sombra, de un día seleccionado para Sants y Sant Martí de Provençals; se contraste los resultados de ambos casos.

Y resulta interesante comprobar que la diferencia térmica del clima urbano es más evidente desde el punto de vista del LST que del LSAT. Además, desde el enfoque del LST, Sants presenta mayor incidencia en diferencia térmica debido que a pesar de presentar mayor temperatura en el día, por la noche obtiene una temperatura similar a Sant Martí de Provençals.

Es necesario precisar que el LST y LSAT de día es más elevada en Sants sumando 3.5°C y 1°C demás, respecto a Sant Martí de Provençals. Sin embargo, si se analiza desde la temperatura media de las superficies expuestas al sol, Sants supera en 5.59°C a Sant Martí de Provençals; mientras las expuestas a la sombra son similares con una diferencia de 1.48°C a Sants. Por la noche, el LST en los dos casos alcanzan 29°C, por su parte, el LSAT los 27°C; es decir, que ambas temperaturas tienden a ser similares a la hora del registro en campo. (00.00 a 01.00 horas)

Tabla 37: Diferencias térmicas del LST y LSAT

	CASO N°1	CASO N°2	Diferencia
LST			
LSTm día	41.22	37.69	3.53
LSTm sol	47.45	41.86	5.59
LSTm sombra	34.99	33.51	1.48
LSTm noche	29.98	29.49	0.49
Diferencia	11.24	8.20	
LSAT			
LSATm día	31.48	30.49	0.99
LSATm noche	27.60	27.91	-0.31
Diferencia	3.88	2.58	

Fuente: Elaboración propia

Respecto a los objetivos secundarios planteados, se concluyen en:

- **Cuantificar la tipología de coberturas de superficies horizontales en el espacio público y determinar el LST incidente en condiciones de sombra y sol en el contexto de la morfología urbana inmediata.**

Se registra un total 10 tipos de coberturas en el espacio público entre los dos casos analizados, coincidiendo en 4 tipos -asfalto color negro, panot "4 tabletas" loseta de hormigón y suelo desnudo o con poca vegetación-. Del análisis comparativo resulta ser el asfalto el de mayor cuantía, empleado en el 55% y 32% del espacio público para Sant Martí de Provençals y Sants, respectivamente; luego en menores proporciones, el uso del Panot "4 tabletas" con 30% respecto a un 10% y el del hormigón liso con 5% respecto a un 29%. (tabla 15, figura 47)

Al haber procesado la información digitalmente del efecto de sol y sombra en tres horarios en espacios públicos según el día de la medición en campo de los casos, se realiza la cuantificación de sombreamiento. Del análisis comparativo resulta interesante las diferencias que presentan, esto quiere decir, en hora de la mañana existe más sombreamiento en Sants con 47% -respecto al 25% del segundo caso. En la hora pico más alto del día, existen mayores superficies expuestas al sol, por lo que bajo sombra Sants alcanza el 30% respecto al 23% del segundo caso. Por el contrario, en la tarde, Sant Martí de Provençal alcanza el sombreamiento máximo, con 71% respecto al 48% de Sants. Por lo tanto, en cuanto a efectos de sol y sombra en superficies

horizontales del espacio público, en Sant Martí de Provençals las superficies se caracterizan por estar mayormente soleadas en el día, excepto en horas antes de anoecer; mientras que Sants es más proporcionado durante la mañana y antes del anoecer porque en la hora pico más alto del día la exposición al sol es superior notablemente. (tabla 14, figura 42)

Tras el análisis combinado de los datos independientes previos, sobre la cantidad de superficies expuestas al sol y sombra, se presenta que las coberturas ubicadas bajo sombra no superan el 15% de superficie durante la mañana y hora pico más alto del día, en ambos casos; a excepción de horas antes del anoecer, en que el asfalto color negro y panot “4 tabletas” alcanzan 39% y 22% bajo sombra, para Sant y Sant Martí de Provençals.

- **Registrar el comportamiento de las variables climáticas (*LSAT*, humedad relativa, velocidad de viento) del microclima urbano -de día y noche- en espacios públicos y representarlos mediante modelos de simulación.**

Los modelos de simulación térmica de estas variables climáticas, permiten visualizar y analizar su comportamiento espacialmente, aunque estas alcanzan mayor detalle al haberlos medido en 4 horarios del día. Respecto al *LSAT*, en Sants se concentra durante el día y noche al interior y al centro de la trama urbana excepto en la hora pico más alta del día, donde incide sobre la Rambla de Badal. Mientras que en Sant Martí de Provençals, se observa un desplazamiento de la concentración térmica a medida que transcurre el día hasta la noche, en este sentido: al sur por la mañana, al oeste en el pico más alto del día, al norte horas antes del anoecer y al sur por la noche. (figura 64 y 65)

Sobre la humedad relativa, destaca su incidencia al interior de la trama urbana distribuido heterogéneamente durante el día, mientras que por la noche incide sobre la Rambla de Badal. Por su parte en Sant Martí de Provençals, se observa un comportamiento inverso al del *LSAT*, excepto que por la noche no solo se registra mayor humedad al norte sino al sur, sobre la Rambla de Guipúzcoa. (figura 57 y 58)

Sin bien la velocidad de viento alcanzado en Sants es de 3.10m/s máximo medio, se precisa que se ubica mayormente en Rambla de Badal, pero antes anoecer incide al interior de la trama urbana mientras que en la noche la velocidad de viento es mínima, de 0.70m/s. Si bien en Sant Martí de Provençals alcanza una velocidad máxima media de 4.30m/s, su distribución no es homogénea, se observa cierta inclinación sobre la Rambla de Guipúzcoa en el día, pero hacia el anoecer se registra al interior. (figura 72 y 73)

- **Registrar el comportamiento del *LST* del microclima urbano -de día y noche- en espacios públicos y representarlos mediante modelos de simulación desde los enfoques de tipología de coberturas y puntos de medición.**

Los modelos de simulación térmica de *LST*, permiten visualizar y analizar su comportamiento espacialmente, aunque estas alcanzan mayor detalle al haberlos medido en 4 horarios del día. Por lo tanto, en Sants su mayor incidencia se da hacia el norte -tanto al interior de la trama urbana y parte de la Rambla de Badal- mientras que durante el resto del día y noche predomina su incidencia en Rambla de Badal (a esto hay que recordar que debajo existe un paso a desnivel). Por su parte,

Sucede lo contrario en Sant Martí de Provençals, debido que durante el día presenta mayor incidencia del *LST* en Rambla de Guipúzcoa, mientras que hacia el anoecer presenta superficie de rápido enfriamiento. (figura 80 y 81)

- **Determinar las coberturas en superficies horizontales del espacio público que mayor radiación solar generan y su comportamiento -de día y noche- en dos contextos urbanos diferentes.**

El análisis comparativo de las tipologías de coberturas, diferenciados en 3 horas del día, indica para Sants que la mayoría de coberturas expuestas al sol tiene a incrementar su temperatura hacia la tarde y siempre son superiores a las expuestas a sombras, la mayor radiación se da en la hora pico del día, es decir en el rango horario 2. Por lo que, respecto a coberturas soleadas, el suelo desnudo o con poca vegetación es que mayor radiación genera en la mañana y la hora pico más alta del día (57.90°C), mientras que le sigue el asfalto color negro (54.71°C), el panot “4 tabletas” (54.05°C), el panot “La flor” (53.22°C), mientras el adoquín y loseta de hormigón presentan radiaciones menores (oscila entre 48.60 a 51.71°C). Mientras, que las coberturas sombreadas en la mañana, registran temperaturas de 30°C en promedio, tienden a subir hasta los 40°C máximo por la tarde y antes del anochecer se reducen hasta en 2°C. (figura 76)

Por otro lado, Sant Martí de Provençals presenta superficies cuyas radiaciones, en la hora pico del día, son menores en 3°C respecto a Sants, la arena es el que mayor radiación genera de 54.17%, seguido del asfalto de color rojo (51.55%) y negro (51.55%). Pero el suelo desnudo o con poca vegetación es el que menor radiación registra comparado al de Sants- caso opuesto-. En cuanto a las superficies sombreadas, es destacable indicar que las temperaturas de superficies en la mañana tienden a ser similares a los del anochecer, mientras que en la tarde siempre es elevado, pero siempre por debajo de las soleadas. (tabla 77)

- **Cuantificar las diferencias térmicas del *LST* del microclima urbano -de día y noche- en espacios públicos de dos contextos urbanos diferentes.**

Si bien este objetivo específico forma parte del proceso para la resolución de la segunda hipótesis -previamente detallada-, el desarrollo de la presente se presenta desde el enfoque de las coberturas; y se presenta el detalle de dos diferencias térmicas.

Diferencia 1: Respecto a las diferencias térmicas del *LST* bajo sol en el rango horario 2 (hora pico más elevado del día) y el *LST* rango horario 4 (noche), oscila entre 20 a 28°C (el máximo registrado para el suelo desnudo o poca vegetación) para Sants, mientras, que va desde 17 a 25°C (el máximo registrado para la arena) para Sant Martí de Provençals.

Diferencia 2: Respecto a las diferencias térmicas del *LST* media durante el día y noche, el suelo desnudo o con poca vegetación es la cobertura que más rápidamente se enfría (en 14.71°C) mientras que el adoquín color terracota supera en diferencia térmica (de 2°C) al de color gris para el caso de Sants. Sant Martí de Provençals, por su parte, registra a la arena una diferencia térmica de 9.13°C como máximo, y el resto en promedio de 7 a 8°C, pero en este caso el suelo desnudo o con poca vegetación es el que menor diferencia registra -la mitad de diferencia que el de Sants-. Entre los dos casos de estudio, alcanza los 3°C en su mayoría de coberturas -asfalto color negro, panot “4 tabletas”, panot “La Flor”, Loseta de Hormigón, arena-, mientras que alcanza los 7°C de diferencia en el suelo desnudo o poca vegetación.

Por tanto, al comparar las diferencias térmicas de los dos casos de estudio, contabilizando las tipologías de coberturas que ambos casos comparten, se muestra que el mayor enfriamiento de las superficies en Sants considerando que ambos *LST* de noche son similares (29 a 30°C).

Tabla 38: Diferencias térmicas del LST según tipología de coberturas

Variable LST / Cobertura	Asfalto negro	Asfalto rojo	Panot "4 tabletas"	Panot "La Flor"	Adoquín gris	Adoquín terracota	Loseta de hormigón	Piedra de granito	Arena	Suelo desnudo o poca vegetación
CASO N°1										
LSTm sol -RH2	54.71		54.05	53.22	51.71	48.60	51.58			57.90
LSTm día	41.65		40.88	40.06	39.68	41.12	41.18	44.40		44.21
LSTm noche	30.33		30.92	29.35	28.95	28.40	29.70			29.50
Diferencia 1*	24.38		23.13	23.87	22.76	20.20	21.88			28.40
Diferencia2**	11.32		9.96	10.71	10.73	12.72	11.48			14.71
CASO N°2										
LSTm sol - RH2	51.27	51.55	48.40				46.40		54.17	47.14
LSTm día	38.37	38.27	37.07				37.42		37.43	36.01
LSTm noche	30.06	30.10	29.63				29.33		28.30	28.44
Diferencia 1*	21.21	21.45	18.77				17.07		25.87	18.70
Diferencia 2**	8.31	8.17	7.44				8.10		9.13	7.56

Fuente: Elaboración propia

* Diferencia térmica entre el LST bajo sol en el rango horario 2 (hora pico más elevado del día) y el LST rango horario 4 (noche)

** Diferencia térmica entre el LST media de día (implica el promedio de las áreas sombreadas y soleadas) y el LST media de noche (es decir el rango horario 4)

- Reconocer y comprobar las relaciones significativas de los indicadores calculados mediante teledetección y las variables morfológicas.

Los indicadores de imágenes satélites sirven como referencia a esta investigación debido a la poca resolución aplicable para este tipo de estudio, pero aún así, se realiza los análisis respectivos de relaciones, y resulta el ancho de vía, el aspect ratio las variables más relacionadas a estos indicadores, principalmente sobre los de intensidad de terrenos edificadores. Para Sant Martí de Provençals las relaciones son más intensas, pero no sucede lo mismo en su relación con el LST y LSE.

Tabla 39: Correlación de Pearson entre variables de morfolología e indicadores de Landsat-8

Indicadores de Landsat-8/ morfológicos	Intensidad de edificatoria	Verticalidad	Ancho de vía	Aspect ratio	Orientación
CASO N°1					
LSTm día	-0.59	-0.43	-0.41	0.15	0.07
NDBIm día	-0.49	-0.62	-0.53	0.37	0.18
BUM día	-0.57	-0.54	-0.53	0.35	0.11
IBIm día	-0.47	-0.36	-0.37	0.24	-0.05
LSEm día	0.63	0.46	0.35	-0.10	-0.22
ALBEDOm día	-0.52	-0.63	-0.53	0.22	0.22
CASO N°2					
LSTm día	0.10	-0.26	-0.35	0.30	0.30
NDBIm día	-0.18	-0.42	-0.60	0.55	-0.51
BUM día	-0.06	-0.40	-0.70	0.67	-0.31
IBIm día	0.15	-0.31	-0.74	0.76	-0.07
LSEm día	-0.36	0.13	0.43	-0.49	0.16
ALBEDOm día	-0.58	-0.25	-0.14	0.00	0.15

Fuente: Elaboración propia

- **Determinar las variables físicas de la morfología urbana en dos escenarios de la ciudad de Barcelona que tienen mayor incidencia sobre las variaciones de temperaturas urbanas.**

Este objetivo específico forma parte del proceso para la resolución de la primera hipótesis. previamente detallada.

No se registran relaciones moderadas o significativas entre las variables de la morfología urbana analizadas y el *LSAT* de día o de noche, tanto para Sants como para Sant Martí de Provençals. Sin embargo, las variables de la morfología urbana analizadas en Sants, que están más relacionadas al *LST* son el ancho de vía, el aspect ratio, la intensidad de uso y la verticalidad (orden de acuerdo a la importancia), por su lado, la intensidad edificatoria es la única variable que está relacionada moderadamente al *LST*.

- **Señalar e identificar la relación de las variables morfológicas y climáticas sobre las temperaturas de superficies horizontales en el espacio público.**

Este objetivo específico forma parte del proceso para la resolución de la primera hipótesis. previamente detallada.

- **Modelar el *LST* máxima alcanzada de día a una escala local, equivalente a 2.5m²/pixel, mediante la media del *LST* según tipología de coberturas registradas en campo.**

Registrar las temperaturas térmicas en diferentes horas del día y noche de las diferentes coberturas en superficies horizontales del espacio público, sumado el factor del efecto sol y sombras para el registro del *LST*, precisa más detalle para luego calcular la media por tipo de cobertura en la hora pico más alta del día, debido que la otra fuente de apoyo -imagen satelital de Landsat-8- es limitada y solo supone calcular temperaturas similares a las medias de día.

Por lo que, mediante el uso de dos herramientas digitales se modela el *LST* máxima de día con la generación de un ráster de 2.5m²/pixel de resolución, que es una resolución similar a satélites privados, por tanto, a pesar que el desarrollo de esta investigación se realiza con datos, información y programas digitales de acceso libre, es posible alcanzar la representación del *LST* -con la condicionantes del efecto sol y sombra- de dos contextos urbanos de características físicas diferentes en la ciudad de Barcelona, en la hora y día de mayor radiación de 2018.

Tabla 40: Comparación de valores medios de variables de los casos de estudio

VARIABLES		CASO N°1	CASO N°2
Área	m ²	96529.65	90518.18
Superficie pública	m ²	28382.60	48128.21
	%	29.40	53.17
Superficie privada	m ²	68147.05	42389.97
	%	70.60	46.83
VARIABLES MORFOLÓGICAS			
Intensidad edificatoria		5300.57	17803.88
Verticalidad		18.76	24.81
Ancho vial		16.14	28.41
Aspect ratio		1.92	0.93
Sombreamiento	RH1	46.67	25.21
	RH2	30.00	23.01
	RH2	48.56	71.25
Orientación		107° NO	134° NO
VARIABLES CLIMÁTICAS			
Atmosférica - medición			
LSAT día	PROM	31.48	30.49
	RH1	31.83	30.79
	RH2	32.59	30.94
	RH3	30.04	29.74
LSAT noche		27.60	27.91
HR día		59.77	67.64
HR noche		76.11	72.63
VV día		0.97	1.22
VV noche		0.11	0.04
Superficial - medición			
LST día	PROM	41.22	37.69
	RH1	39.89	36.30
	RH2	46.41	43.22
	RH3	36.02	33.98
LST sol		47.45	41.86
LST sombra		34.99	33.51
LST noche		29.98	29.49
Superficial - Landsat 8			
LST día		38.15	35.67
NDBI		0.10	-0.02
BU		-0.03	-0.29
IBI		0.44	0.35
Albedo		19.95	20.81
LSE		0.95	0.96

Fuente: Elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

- AccuWeather, Inc. (2019). Predicciones diarias del tiempo de día y noche en Barcelona. Recuperado el 21 de julio de 2019, de: <https://www.accuweather.com/es/es/spain-weather>
- AMB, (2017). Geoportal de Cartografía. Recuperado el 16 de julio, 2019 de: <https://geoportalcartografia.amb.cat/AppGeoportalCartografia2/index.html>
- Área Metropolitana de Barcelona [AMB], (2015). La isla de calor en el área metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. Recuperado el 9 de abril 2019, de: <http://www.amb.cat/es/web/medi-ambient/actualitat/publicacions/detall/-/publicacio/la-isla-de-calor-en-el-area-metropolitana-de-barcelona-y-la-adaptacion/5773152/11818>
- Arellano B. & Roca J. (2018). Can urban design mitigate the UHI effect? A: International Symposium on Remote Sensing. "SPIE Remote Sensing 2018". Washington: International Society for Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), p.1-16.
- Arellano B., Roca J. & Batlle E. (2018). "Green areas and urban heat island: combining remote sensed data with ground observations" Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XV. California: International Society for Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), p.1-15.
- Arellano B., Roca J. & Biere R. (2018). Planning and urban climate: the example of the metropolitan area of Barcelona. A: International Symposium on Remote Sensing. "SPIE Remote Sensing 2018". Washington: International Society for Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), p. 1-17.
- Artis D. A. & Carnahan W. H. (1982), Survey of emissivity variability in thermography of urban áreas. Remote Sensing of Environment, 12, p. 313 - 329
- Ayuntamiento de Barcelona (2018). Plan Clima 2018-2030. Recuperado de https://bcnroc.ajuntament.barcelona.cat/jspui/bitstream/.../3/Plan_Clima_2018-2030.pdf
- Ayuntamiento de Barcelona (2018, a). Estadísticas de Barcelona, distritos y barrios. Recuperado el 2 de agosto, 2019 de. <https://www.bcn.cat/estadistica/castella/index.htm>
- Baumuller J., Hoffmann U. & Reuter U. (1992). Climate booklet for urban development, Ministry of Economy Baden-Wuerttemberg, Environmental Protection Department
- Bruse, M. & Fleer H. (1998). Simulating Surface-Plant-Air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, Environmental software and modelling, (13), p.373–384
- Bruse, M. (2011) ENVI-met (Version 3.1 BETA V). Recuperado el 16 de julio, 2019 de: <http://www.envi-met.com/>
- Canon (2019). Cámaras réflex. Recuperado el 9 de julio, 2019 de: http://www.ub.edu/aigua/ca/activities/show/objects_id/1647
- Cardozo O. & Da Silva C. (2012). Listado bibliográfico en Sensores Remotos. LabTIG (UNNE-CONICET). Inédito.
- Cardozo O. & Da Silva C. (2013). Aplicaciones Urbanas de los Sensores Remotos. Revista Geográfica Digital. IGUNNE. Facultad de Humanidades. Recuperado de: <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default.htm>
- Carreras C., Marín M., Martín-Vide J., Moreno M. & Sabí J. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona. Documents D'anàlisi Geogràfica 17, p. 51-77.

- Cena K. & Clark (1981). Bioengineering, thermal physiology and comfort. Amsterdam-Oxford-New York. ISBN 0-444-99761-X
- Centre de Política de Sòl i Valoracions [CPSV], (2016). Urban-CLIMPLAN. La isla de calor urbana: efectos en el cambio climático y modelado para estrategias de planeamiento territorial y urbano. Aplicación a la región metropolitana de Barcelona. Recuperado el 22 de marzo de 2019, de <http://www.upc.edu/cpsv/indexrecerca.htm>
- Chandler T. (1965). The climate of London. The Geographical Journal, (175) p.82-83. Recuperado de: http://urban-climate.org/documents/TonyChandler_TheClimateOfLondon.pdf
- De Castro M., Martin-Vide J., Alonso J. (2005). El clima de España: Pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. España: Ciencia abierta (DC), p.1-64.
- Dot Jutglà E. (2019). Mutación del espacio económico a partir de la actividad turística: el caso de los barrios el Poblenou y Sants en Barcelona (2005-2016). Cuadernos de Turismo, (43) p. 271-300. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.6018/turismo.43.11>
- Erell, E. (2008). The Application of Urban Climate Research in The application of urban climate research in the design of cities Advances in Building Energy Research. Advances in Building Energy Research, 2(1), 95–121. <http://doi.org/10.3763/aber.2008.0204>
- Esparza D. (2014). El diseño del suelo: el papel del pavimento en la creación de la imagen de la ciudad (Tesis doctoral). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2445/55839>
- European Environment Agency [EEA], (2012). Urban adaptation to climate change in Europe: Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies. Dinamarca: Copenhagen.
- Fernández F. (2016). La climatología urbana en España en los últimos 30 años. España: UNE
- Flir Systems, Inc. (2014). Global specifications. Recuperado el 09 de julio de 2019, de Skywatch Windoo: <http://windoo.ch/specifications>
- García A. (2017). Isla de frío de los parques urbanos: Una aproximación desde el estudio de la influencia climática de los parques urbanos en Barcelona (Tesis de master). Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/111788>
- Garratt J. R. (1992). The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge University Press, 8, p.224–257
- Hamblyn R. (2007). Luke Howard's intellectual milieu. IAUC Newsletter 21, p.6-7. Recuperado de: www.urbanclimate.org.
- Harman I. (2003). The energy balance of urban areas. (Tesis doctoral). Recuperado de: <http://www.met.rdg.ac.uk/phdtheses/The%20energy%20balance%20of%20urban%20areas.pdf>
- Hernández A. (2013). Manual de Diseño Bioclimático Urbano. Recomendaciones para la elaboración de normas urbanísticas. Instituto Politécnico de Bragança.
- Howard L. (1833). The Climate of London, Vols.I-III, Harvey and Dalton, London.
- Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña [ICGC] & Universidad De Barcelona [UB]. Estudio de la respuesta térmica del ecosistema urbano y la distribución geoespacial de sus impactos. Recuperada el 09 de julio de 2019 de: <http://www.icgc.cat/es/Innovacion/Proyectos-I-D-i/Clima-y-zonificacion-urbana>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], (2007): Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. Suiza: Ginebra.

- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], (2014) Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal, Pachauri, R.K y Meyer, L.A. (eds.)]. Suiza: Ginebra, p. 157.
- JDC Electronic S.A. (2014). Global specifications. Recuperado el 09 de julio de 2019, de: Skywatch Windoo: <http://windoo.ch/specifications>
- Kratzer A. (1956). The climate of cities. Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Mass
- López A., Arroyo, F. & Fernández F. (1993). Frecuencia e intensidad de la isla de calor en Madrid. ISN, p.91-112.
- Martin-Vide J. (2016). Cambio climático y modificación local del clima en Barcelona. Simposio internacional de investigación 2016: El agua y el espacio público. Recuperada el 18 de marzo de 2019 de: http://www.ub.edu/aigua/ca/activities/show/objects_id/16kratzer
- Matzarakis A., Rockle R., Richter C.J. (2005). Urban climate analysis of Freiburg – An integral assessment approach. In Paper Presented at the 4th Japanese – German Meeting on Urban Climatology, Tsukuba, Japan. Recuperada de <http://www.kenken.go.jp/japanese/information/information/event/jgmuc/report/c3.pdf>
- Mills G. (2009): Luke Howard, Tim Oke and the study of urban climates. Advancing Science, serving society sin 1919.
- Moreno M. (1993). Estudio del clima urbano de Barcelona: la isla de calor. Barcelona: Solgraf, S.A.
- Moreno M. (1999). Climatología urbana. Barcelona: Universitat de Barcelona
- National Aeronautics and Space Administration [NASA] (2009). Climate and Earth's Energy Budget Obtenido de <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
- Oke T. (1978). Boundary layer climates. York, Canadá: Methuen and Co LTD.
- Oke T. (1988). The urban energy balance. Geography Progress in Physical, 12, 470–508. <http://doi.org/10.1177/030913338801200401>
- Oke T., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. (2017). Urban Climates Recuperada de: <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Pal S. (1998). Introduction to Micrometeorology. Usa: North Carolina. 2, p.79.
- Real Academia Española [RAE]. (2008). Recuperado el 5 de mayo de 2019 de: <http://www.rae.es/>
- Ren C, Yan-yung E. & Katzschner L. (2011). Urban climatic map studies: a review. International Journal of Climatology, 31, p. 2213 – 2233. Recuperado de: 10.1002/joc.2237
- Rizwan A., Dennis L. & Lui C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Journal of Environmental Sciences, 20,1, p.120-128.
- Roth M. (2000). Review of atmospheric turbulence over cities. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 126, p.941- 990.
- Tumini, I. (2010). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. En Ponencia SB10 MAd, Edificación sostenible, Revitalización y Rehabilitación de Barrios. Madrid, España.

- Servicio de Meteorología de Cataluña [METEO.CAT] (s.f.). Estaciones meteorológicas (XEMA y XOM). Recuperado el 04 de abril de 2019, de: <http://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/serveis-i-dades-climatiques/anuaris-de-dades-meteorologiques/xarxa-destacions-meteorologiques-automatiques/>
- Sobrino J. & Raissouni N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco, *International Journal of Remote Sensing*, 21:2, 353-366, Recuperado de: 10.1080/014311600210876
- Stewart I. & Oke T. (2012). Local Climate zones for urban temperature studies. *American Meteorological society*, p.1880-1900.
- Stewart I., Oke T.& Krayenhoff E. (2014). Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology* 34, p.1062-1080.
- Sun Q., Tan J. & Xu Y. (2010). An ERDAS image processing method for retrieving LST and describing urban heat evolution: a case study in the Pearl River Delta Region in South China, *Environ Earth Sci.*, 59, p.1047- 1055. Recuperado de: 10.1007/s12665-009-0096-3
- U.S. Environmental Protection Agency [U.S.EPA]. (2008). Reducing urban heat island: Compendium of strategies. Washington, Estados Unidos: Autor. Recuperado de <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
- The association o German Engineers [VDI]. (1997). VDI-Guideline 3787, Part 1, Environmental Meteorology-Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions. VDI, Beuth Verlag: Berlín.
- Tumini, I. (2012). El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid (Tesis de doctorado). Recuperado de http://oa.upm.es/14893/1/IRINA_TUMINI.pdf
- Voogt, J. (2007). How urban researches measure urban heat islands. Recuperado de https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-07/documents/epa_how_to_measure_a_uhi.pdf